

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДГТУ
Вестник
Донского
государственного
технического
университета
ДГТУ
85
1930-2015
Vestnik of Don State Technical University
Том 15
№4 (83)
2015
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
И НАУЧНО-
ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
ISSN 1992-5980
DOI 10.12737/issn.1992-5980
МЕХАНИКА
Mechanics
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
Machine Building and Machine Science
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
Information Technology, Computer Science, and Management
ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
Processes and Machines of Agro-Engineering Systems
БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
Safety of Human Activity
science.donstu.ru

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2015
Т. 15, № 4 (83)

**Теоретический
и научно-практический журнал**

Включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25.07.2014 г. №793 с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03.06.2015 г. №560

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
октябрь-декабрь 2015 г.

Подписано в печать 28.09.2015., дата выхода в свет 30.09.2015.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать офсетная.
Усл. печ. л. 22,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 180 Цена свободная.

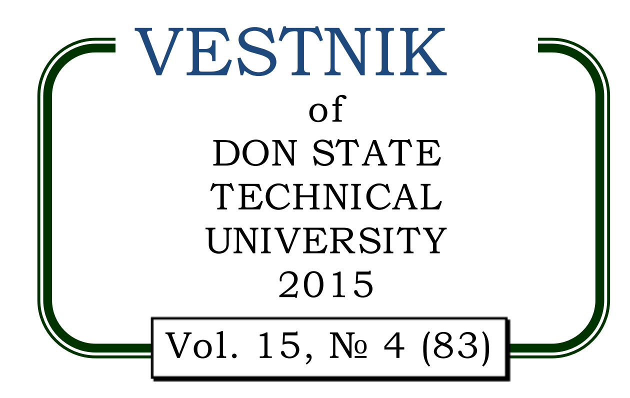
Адрес редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

Адрес издателя:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

Адрес полиграфического предприятия:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.

http://science.donstu.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-35012 от 16.01.09., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций



Theoretical and scientific-practical journal

Included in the list of peer-reviewed scientific editions where the basic research results of doctoral, candidate's theses should be published in accordance with order of Ministry of Education and Science of RF no. 793, July 25, 2014, as amended by order of the Ministry of Education and Science of RF no.560, June 3, 2015.

4 issues a year
October — December 2015

Founder and publisher — Don State Technical University

The issue is prepared by: Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 28.09.2015, imprint date 30.09.2015.
Format 60×84/8. Font «Times New Roman». Offset printing.
C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop. Order 180. Free price.
Editorial Board's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
Publisher's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
Printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.
http://science.donstu.ru
Certificate of mass media registration ПИ № ФС 77-35012 of 16.01.09. issued by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications and Mass Communications

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

ДГТУ – 85 лет



Развитие научных направлений в Донском государственном техническом университете

Development of research areas in don state technical university

В мае 1930 года был основан Северо-Кавказский институт сельскохозяйственного машиностроения (СКИСХМ), впоследствии реорганизованный в РИСХМ, а затем — в Донской государственный технический университет. С первых лет работы особое внимание в ВУЗе всегда уделялось научно-исследовательской работе. В соответствии с основным профилем учебного заведения важнейшие научные исследования проводились в таких областях, как сельскохозяйственное и общее машиностроение, машиноведение. Однако с середины прошлого века развитие института обусловило расширение области научных исследований. В частности, появились такие направления, как техносферная безопасность, автоматизация, информационные технологии.

In May 1930 North-Caucasus Institute of Agricultural Machine-Building (SKISKhM) was established. It was later reorganized into Rostov Institute of Agricultural Engineering (RISKhM), and then – into Don State Technical University. From the start, special attention was paid to the research work of the University. In accordance with the basic specialization of the Institution, major research investigations were carried out in such areas as Agricultural and General Engineering, and Machine Science. However, since the middle of the last century, the development of the University has led to the widening of the research areas. In particular, such areas as Technosphere Safety, Automation, and Information Technologies were developed.

Безопасность деятельности человека
Human Activity Safety

В 1967 года была всесторонне изучена сложившаяся практика работы, и Совет РИСХМ обратился в Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР с просьбой разрешить организовать кафедру «Охрана труда». Сначала было решено открыть лабораторию «Охрана труда». В течение 1967–1968 гг. были проведены работы по ее оборудованию. Однако следующей целью администрации стало создание кафедры. Она была организована в 1968 году. Заведующим был назначен доцент Н. П. Кравченко. С 1 сентября 1968 года курс «Охрана труда» стал обязательным для прохождения студентами всех специальностей.

In 1967 the common research practice was comprehensively studied, and the RISKhM Council applied the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Russian Federation with request for permission to organize the Occupational Safety Department. At first, it was decided to open the Occupational Safety Laboratory. During 1967-1968 the laboratory was equipped. However, the next administration goal was creating a department. And it was established in 1968. N.P. Kravchenko, associate professor, headed the Department. The Occupational Safety course has become compulsory for all students since September 1, 1968.



Кравченко
Николай Павлович
(зав. кафедрой с 1968 г. по 1974 г.)
Kravchenko Nikolay P.
(Head of the Department in 1968-1974)



Воличев
Анатолий Васильевич
(зав. кафедрой с 1974 г. по 1978 г.)
Volichev Anatoly V.
(Head of the Department in 1974-1978)



Аствацатуров
Артем Ервандович
(зав. кафедрой с 1979 г. по 2006 г.)
Astvatsaturov Artem E.
(Head of the Department in 1979-2006)

В 1986 году кафедра «Охрана труда» переименована в кафедру «Охрана труда и окружающей среды». В 1995 году на базе кафедры организовано Донское отделение Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, которое возглавил заведующий кафедрой А. Е. Аствацатуров. Под его руководством с 1979 г. по 2006 г. проведена большая научно-исследовательская работа. В частности, разработаны теоретические основы безопасности труда человека-оператора в машиностроении, созданы и внедрены новые научно-прикладные направления, в том числе «Основы инженерной эргономики», подготовлена научно-образовательная база для обучения студентов профильных специальностей.

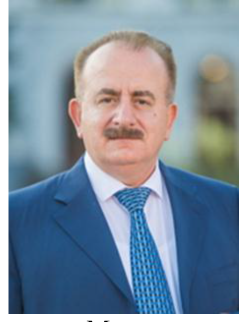
В 1996 году кафедра «Охрана труда и окружающей среды» получила лицензию на подготовку и выпуск инженеров по специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды». В 1999 году организована научная лаборатория «Технические средства экологии» (ТСЭ). Проводя исследования на стыке разных областей знаний — философии и охраны труда, профессор А. Е. Аствацатуров вышел на новое направление в науке и защитил докторскую диссертацию по теме «Философия научного оптимизма в решении планетарных экологических проблем». Результаты его исследований опубликованы в разных странах, в частности, в США, Германии, Канаде, Великобритании. С 2001 года кафедра «Охрана труда и окружающей среды» готовит инженеров-экологов. Более 30 студентов отмечены высокими наградами, повышенными стипендиями (в том числе стипендиями им. В. И. Вернадского).

В 2004 году кафедра стала называться «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды». В 2006 году ее возглавил доктор технических наук, профессор Бесарион Чохоевич Месхи — ныне ректор ДГТУ.

In 1986 the Occupational Safety Department was renamed as the Occupational and Environmental Safety Department. In 1995 Don Branch of the International Academy of Ecology and Life Safety was organized on the base of the Department. A.E. Astvatsaturov headed it. Under his supervision from 1979 to 2006, an extensive research work was carried out. In particular, the theoretical basis of the labor safety for human-operator in engineering was developed; new research and applied areas, including Fundamentals of Engineering Ergonomics, were created and introduced; the research and educational base for training students of the major specialties was prepared.

In 1996 the Occupational and Environmental Safety Department received a license for the training and turn-out of engineers majoring in 280202 “Environmental Engineering protection”. In 1999 the scientific laboratory “Ecology Engineering” (EE) was organized. Through research at the intersection of various fields of knowledge – philosophy and labor safety – Prof. A.E. Astvatsaturov has developed a new research area and defended his doctoral dissertation on the topic “Philosophy of scientific optimism in the planetary environmental problems solution”. His research results were published throughout the world, particularly in the USA, Canada, Germany, and the UK. Since 2001 the Occupational and Environmental Safety Department has been training environmental engineers. More than 30 students are distinguished with high awards, enhanced stipends (including scholarships after V.I. Vernadskiy).

In 2004 the department was called Life and Environment Protection Sciences Department. In 2006 it was headed by Dr.Sci. (Eng.), Professor Besarion Chokhoevich Meskhi, now Rector of DSTU.



Месхи
Бесарион Чохоевич
Meskhi
Besarion Chokhoevich

С 2006 года ведется обучение по специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств», а с 2008 года — по специальности 280104 «Пожарная безопасность». Следует отметить, что получение высшего профессионального образования предполагает обязательное активное участие студентов в научно-исследовательской работе кафедры. Таким образом, обучающиеся получают основательную научно-теоретическую подготовку и овладевают современными

Since 2006 students have been trained in 280102 “Technological Processes and Production Safety “, and since 2008 – in 280104 “Fire Safety”. It should be noted that getting higher vocational education suggests active involvement of students in the research work of the Department. Thus, the students receive a thorough scientific and theoretical training, and master in modern

методами проведения научных исследований. Высокий научный и педагогический уровень профессорско-преподавательского состава кафедры обеспечивает соответствующее качество научно-исследовательской работы.

Под руководством доктора технических наук, профессора Б. Ч. Месхи разработаны фундаментальные основы методологии математического моделирования формирования опасных и вредных производственных факторов, заложены основы проектирования систем и средств защиты операторов машиностроительных производств от комплексного воздействия негативных факторов техносферы. Б. Ч. Месхи возглавляет диссертационный совет по направлению 05.26.01 «Охрана труда».

Под руководством доктора технических наук, профессора кафедры Ю. И. Булыгина созданы математические и компьютерные модели процессов тепломассопереноса вредных веществ на различных машиностроительных предприятиях, предложены способы и средства защиты работников от воздействия вредных факторов производства.

Доктор технических наук, профессор кафедры Ю. В. Есипов в сотрудничестве со специалистами Южного научного центра РАН в течение ряда лет участвовал в разработке современного подхода к мониторингу и диагнозу целостных конструкций. Ими были предложены новые информативные деформационные показатели на основе прецизионных сегнетоэлектрических датчиков динамической деформации. Коллектив кафедры создал методологию факторного параметрического моделирования и возможностной (нечеткой) оценки, позволившую классифицировать качественные и рассчитывать количественные показатели безопасности, риски нетиповых сложных систем.

research methods. A high academic and pedagogical level of the Department teaching staff ensures consistent quality of the research work.

Under the supervision of Prof. B.C. Meskhi, Dr.Sci. (Eng.), the methodology fundamentals of the mathematical modeling of the occupational hazards formation are developed, the basis for designing systems and means of protection for operators of the mechanical production from the integrated effect of the technosphere threats is formed. B.C. Meskhi is Head of the Dissertation Council in 05.26.01 “Labor Safety”.

Under the supervision of Prof. Y.I. Bulygin, Dr.Sci. (Eng.), mathematical and computer models of heat and mass transfer processes of pollutants at various machine-building enterprises, methods and means of protecting workers from exposure to harmful factors of production are developed.

Prof. Y.V. Yesipov, Dr.Sci. (Eng.), in collaboration with the experts of the RAS Southern Scientific Centre over the years participated in the development of the modern approach to the monitoring and diagnosis of the structural integrity. They offered new informative deformation indices based on the high-precision ferroelectric sensors of the dynamic distortion. The Department staff has developed the methodology of factorial parametric modeling and possibility (fuzzy) assessment which allows classifying the qualitative and quantitative indicators and calculating quantity safety indices, as well as the non-type complex systems risks.



Есипов
Юрий Вениаминович
Yesipov Yury V.



Булыгин
Юрий Игоревич
Bulygin Yury I.

Сегодня кафедра «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» предоставляет студентам возможность не только участвовать в научной работе, но и приобретать практические навыки в соответствии с профилем обучения. Так, обучающиеся по специальности 280104 «Пожарная безопасность» получают практическую подготовку в пожарно-спасательном отряде «Донской». Активное участие отряда в пожарно-спасательных мероприятиях города отмечено руководством города, области, МЧС России. В 2011 году отряд «Донской» получил лицензию на осуществление деятельности по тушению пожаров. В 2013 году на базе кафедры

Today the Life and Environment Protection Sciences Department provides students with the opportunity both to participate in the research work, and to acquire practical skills in accordance with the specialization. So, the students majoring in 280104 “Fire Safety” receive practical training in the fire-fighting and rescue unit “Don”. An active participation of the unit in the fire and rescue activities of the city is honored by the city and region leaders, and by the Russian Emergency Ministry. In 2011 the “Don” unit received a license to operate fire extinguishing. In 2013 a voluntary ecological

«Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» создан и активно действует волонтерский экологический отряд «ЭкоФорм». Его работа направлена на решение экологических проблем региона.

group "EcoForm" was organized on the basis of the Life and Environment Protection Sciences Department. Its work is aimed at solving environmental problems in the region.

Информатика, вычислительная техника и управление
Informatics, Computer Science, and Control

В этом научном направлении в Донском техническом университете на сегодняшний день реализуются следующие специальности: «Системный анализ, управление и обработка информации», «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», «Системы автоматизации проектирования», «Теоретические основы информатики», «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», «Информационные системы и процессы».

Данные специальности реализуются на кафедрах «Автоматизация производственных процессов», «Информационные технологии», «Кибербезопасность информационных систем», «Прикладная математика», «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», «Вычислительные системы и информационная безопасность», «Математика», «Математика и информатика».

Впервые подготовка студентов по специальности из этой группы, а тогда она называлась «Автоматические, телемеханические и электроизмерительные приборы и устройства», началась в 1957 году на кафедре «Автоматизация производственных процессов». Кафедру возглавил кандидат технических наук. т. н., доцент В. Д. Мартынов. Впоследствии она была переименована в кафедру «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». На ней работали и продолжают трудиться крупные ученые — основатели новых научных школ и направлений. Так, под руководством д. т. н., профессора В. Г. Пустынникова начались исследования в области многочастотного, многопараметрического электромагнитного контроля качества изделий. Доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР в области науки и техники И. В. Дружинин был одним из основателей разработки систем радиоэлектронной борьбы в Советском Союзе.

В разные годы на кафедре работали: В. П. Блохин — доктор технических наук, профессор, директор ВНИИ «Градиент», создатель научной школы в области виброакустической диагностики систем радиолокации; А. В. Суворов — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, внесший большой вклад в создание систем информационного сопровождения движения космических аппаратов; Г. Г. Земсков — доктор технических наук, профессор, исследователь инвариантных систем управления процессами обработки на металлорежущих станках и основатель соответствующего направления.

Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, лауреат государственной премии УССР в области науки и техники В. Л. Заковоротный возглавляет комплекс исследований в области анализа и синтеза сложных нелинейных систем,

Today the following specialties are implemented in this research area of Don Technical University: "Systems Engineering, Control, and Information Processing", "Control Systems and Computing Elements and Devices", "Technological Process and Manufacturing Automation and Control", "Design Automation Systems", "Foundations of Information Science", "Mathematical Modeling, Numerical Computing, and Software Systems", and "Information Systems and Processes".

These specialties are implemented at the following departments – "Production Automation", "Information Technologies", "Cybersecurity of IT Systems", "Applied Mathematics", "Computer and Automated Systems Software", "Mathematics", and "Mathematics and Computer Science".

The first training of students majoring in the specialties of these group (it was then called "Automatic, Telemechanic and Electrical Measuring Instruments and Devices") started in 1957 at the Production Automation Department. The department was headed by V.D. Martynov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor. Later it was renamed as the Technological Process and Manufacturing Automation and Control Department. Eminent researchers - founders of new scientific schools and research areas worked and are still working here. Thus, under the supervision of Prof. V.G. Pustynnikov, Dr. Sci. (Eng.), the investigations in the field of the multifrequency, multiparameter electromagnetic inspection of the product quality were begun. Prof. I.V. Druzhinin, Dr. Sci. (Eng.), Laureate of the USSR State prize in Science and Engineering, was one of the founders of the electronic warfare systems development in the Soviet Union.

At different times prominent scholars worked at the Department: Prof. V.P. Blokhin, Dr. Sci. (Eng.), Director of the All-Russian Research Institute "Gradient", JSC, founder of a scientific school in the field of vibroacoustic diagnostics of the radar systems; Prof. A.V. Suvorov, Dr. Sci. (Eng.), Honored Worker of Science and Technology of Russia, who did much to develop systems of information support for the space traffic; Prof. G.G. Zemskov, Dr. Sci. (Eng), explorer of the invariant systems of the machining process control, and founder of the corresponding area.

Prof. V.L. Zakovorotny, Dr. Sci. (Eng.), Honored Science Worker of Russia, Laureate of the USSR State prize in Science and Engineering, heads a set of studies in the field of analysis and synthesis of the complex nonlinear systems interacting with different media (issues of self-

взаимодействующих с различными средами (вопросы самоорганизации и управления). Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ Ю. О. Чернышев является основателем научной школы «Теория и принципы разработки нетрадиционных моделей и методов решения оптимизационных задач проектирования».

Доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель России Г. Г. Палагнюк внес большой вклад в создание систем диагностики состояния процессов резания и трения. Кроме того, Г. Г. Палагнюк разрабатывал приборы медицинского назначения, в том числе ультразвукового офтальмологического комплекса для безоперационного лечения глаукомы.

Область научных интересов доктора технических наук, профессора В. С. Минакова — электроакустические методы нанесения износостойких покрытий на детали ответственного назначения, в том числе на режущие инструменты, штампы и узлы трения.

Доктор технических наук, профессор М. Б. Флек создал научное направление в области синергетического управления процессами обработки на металлорежущих станках.

organization and control). Prof. Y. O. Chernyshev, Dr. Sci. (Eng.), Honored Science Worker of Russia, founded the scientific school “Theory and principles of the development of non-traditional models and methods for solving optimization design problems”.

Prof. G.G. Palagnyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Inventor of Russia, contributed greatly to the implementation of the diagnosis systems of the cutting and friction processes state. In addition, G.G. Palagnyuk developed medical devices, including ultrasonic ophthalmic system for non-invasive treatment of glaucoma.

The area of expertise of Prof. V.S. Minakov, Dr. Sci. (Eng.), involves the electric audibility methods for the essential components coating, including cutting tools, punches, and friction units.

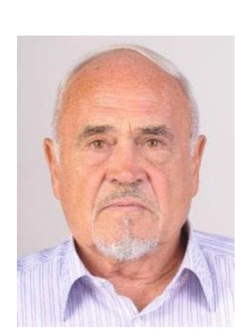
Prof. M.B. Flek, Dr. Sci. (Eng.), struck out in an original direction in the field of the synergetic machining process control.



Пустынников
Василий Григорьевич
Pustynnikov Vasily G.



Заковоротный
Вилор Лаврентьевич
Zakovorotny Vilor L.



Чернышев
Юрий Олегович
Chernyshev Yury O.



Палагнюк
Георгий Георгиевич
Palagnyuk Georgy G.

С 1958 года на факультете «Приборостроение» были открыты специальности «Приборы точной механики» и «Автоматика и телемеханика». В 1972 году в рамках данного научного направления организована кафедра «Прикладная математика и вычислительная техника».

Теория и практика управления техническими объектами активно развивалась на кафедрах «Робототехника и мехатроника» и «Физика». Научная деятельность работавших в этом направлении докторов технических наук, профессоров А. К. Тугенгольда, И. Я. Никифорова, В. С. Кунакова получила признание на мировом уровне.

Области научных интересов заслуженного работника высшей школы РФ А. К. Тугенгольда — динамика и точность технологических машин, интеллектуальные системы управления, мехатроника.

Since 1958 such specialties as “Fine Mechanics Tools” and “Automation and Telemechanics” have been introduced at the Instrument Production Faculty. In 1972 the Applied Mathematics and Computer Science Department was organized as part of this research area.

Theory and practice of the technical objects management was rapidly developed at the Robotics and Mechatronics, and Physics Departments. The scientific activities of Professors A.K. Tugengold, I.Y. Nikiforov, and V.S. Kunakov, Dr. Sci. (Eng.), are recognized on a world-wide basis.

Areas of expertise of A.K. Tugengold, Honorary Figure of Russian Higher Education, include dynamics and accuracy of the production machines, intelligent control systems, mechatronics.



Тугенгольд
Андрей Кириллович
Tugengold Andrey K.



Никифоров
Игорь Яковлевич
Minakov Valentin S.



Минаков
Валентин Степанович
Nikiforov Igor Y.



Кунаков
Виктор Стефанович
Kunakov Victor S.

Одновременно с созданием вуза в 1930 году была основана кафедра «Математика», которую возглавил бывший профессор Варшавского университета, доктор математических наук В. П. Вельмин. Он руководил кафедрой с момента ее основания по 1941 год, а затем с 1945 по 1950 год. В. П. Вельмин — автор более 50 научных публикаций. Следует особо отметить «Введение в теорию алгебраических чисел» — первое учебное руководство по теории чисел на русском языке. Среди учеников В. П. Вельмина: П. С. Папков — директор НИИ физики и математики АН СССР; Д. А. Супруненко — академик АН БССР.

На современном этапе данное направление продолжают развивать сотрудники кафедр «Математика, «Прикладная математика» и «Математика и информатика».

М. А. Краплин — доктор технических наук, профессор, один из ведущих специалистов страны в области математического моделирования технологических процессов металлообработки и решения оптимизационных задач в технологии машиностроения.

Основные сферы научных интересов доктора физико-математических наук, профессора А. В. Братищева — теория функций и функционального анализа, задачи интерполяции и базисности в локально выпуклом пространстве, теория роста целых функций.
Доктор физико-математических наук, профессор Д. А. Пожарский — получатель гранта Президента РФ для молодых докторов наук, награжден медалью Европейской академии наук. Направление его научных исследований: контактные задачи о напряженно-деформированном состоянии неоднородных и анизотропных сред.

Alongside with the establishment of the University in 1930, the Mathematics Department was founded. Former professor of Warsaw University V.P. Velmin, Dr. Sci. (Math.), took charge of it. He was Head of the Department from its foundation till 1941, and then – from 1945 to 1950. V.P. Velmin is the author of over 50 scientific publications. “Introduction to the algebraic number theory” – the first textbook on the theory of numbers in the Russian language – must be particularly noted. P.S. Papkov, Director of the Research Institute for Physics and Mathematics of the AS USSR; and D.A. Suprunenko, member of the Academy of Sciences of the Byelorussian SSR, are among disciples of V.P. Velmin.

In modern times members of the Mathematics, Applied Mathematics, and Mathematics and Information Technology Departments keep on developing this direction.

Prof. M.A. Kraplin, Dr. Sci. (Eng.), is one of the country's leading experts in the field of the mathematical modeling of the metalworking processes, and solving optimization problems in the mechanical engineering.

The main areas of expertise of Prof. A.V. Bratishchev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), include the theory of functions and functional analysis, problems of interpolating and basis property in the locally convex space, the theory of growth of entire functions. Prof. D.A. Pozharskiy, Dr. Sci. (Phys.-Math.), is the recipient of the grant of President of the Russian Federation for young doctors of science. He is awarded a medal of the European Academy of Sciences. His research direction is contact problems on the stress-strain state of inhomogeneous and anisotropic media.


Вельмин
Владимир Петрович
Velmin Vladimir P.


Краплин
Михаил
Александрович
Kraplin Mikhail A.


Пожарский
Дмитрий
Александрович
Pozharskiy Dmitry A.


Князев
Сергей Юрьевич
Knyazev Sergey Y.


Черкесова
Лариса Владимировна
Cherkesova Larisa V.

Доктор физико-математических наук, профессор А. О. Ватульян работает в таких областях, как обратные граничные геометрические и коэффициентные задачи математической физики; метод граничных интегральных уравнений в механике; прямые и обратные задачи для моделей электроупругости и термоэлектроупругости; математические модели биомеханики.

Основное направление научно-исследовательской деятельности заведующего кафедрой «Математика» доктора технических наук, профессора С. Ю. Князева — численное моделирование стационарных и нестационарных физических полей с помощью метода точечных источников поля.

Проблемами нелинейной устойчивости и оценки эффективности асимптотического метода в упругих сферических оболочках при различных граничных условиях, а также вопросами бифуркационной неопределенности в классической механике и флуктуации точек ветвления в геометрически нелинейной теории оболочек занимается доктор физико-математических наук, профессор В.С. Ларченко. Область научных интересов доктора физико-математических наук, профессора Л. В. Черкесовой — нелинейные процессы в радиоэлектронике.

В современных условиях особенно актуальна подготовка специалистов в сфере компьютерных и IT-технологий — в первую очередь, программистов. Соответствующие дисциплины развивают сотрудники кафедр «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», «Информационные технологии», «Кибербезопасность информационных систем».

Доктор технических наук, профессор Б. В. Соболь исследует сингулярные интегральные уравнения, задачи механики разрушения, вопросы стандартизации образования в области информационных технологий. Б. В. Соболь — почетный работник высшего профессионального образования РФ, лауреат премии Правительства РФ.

Под руководством доктора технических наук, профессора А. А. Костоглотова сформирована научная школа «Оптимальные информационные, управляющие и навигационные системы». В ходе научных изысканий в области синтеза оптимального управления техническими системами с использованием инвариантов, а также оптимальной обработки информации в радиолокационных, навигационных системах и системах передачи данных были получены значительные

Prof. A.O. Vatulyan, Dr. Sci. (Phys.-Math.), works in such areas as inverse boundary, geometric and coefficient problems of mathematical physics; the boundary integral equations method in mechanics; direct and inverse problems for the models of electric elasticity and electric thermoelasticity; mathematical models of biomechanics.

The main direction of research activities of Prof. S.Y. Knyazev, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Mathematics Department, is numerical modeling of steady and unsteady physical fields by the method of field point sources.

Prof. V.S. Larchenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), studies problems of nonlinear stability and assessing the asymptotic method efficiency in elastic spherical shells under various boundary conditions, as well as issues of bifurcation uncertainty in classical mechanics, and fluctuation of branchpoints in the geometrically nonlinear theory of shells.

Research interests of Prof. L.V. Cherkesova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), are connected with the nonlinear processes in radio electronics.

Under current conditions the training of specialists in the field of the computer and IT-technologies, primarily programmers, is particularly topical. The appropriate disciplines are developed by the members of the Computer and Automated Systems Software, Information Technologies, and Cybersecurity of IT Systems Departments.

Prof. B.V. Sobol, Dr. Sci. (Eng.), explores singular integral equations, problems of fracture mechanics, and issues of the standardization of education in the field of information technologies. B.V. Sobol is Honorary Worker of Higher Vocational Education of Russia, Laureate of the RF Government award.

Under the supervision of Prof. A.A. Kostoglotov, Dr. Sci. (Eng.), the scientific school “Optimal, information, control, and navigation systems” is formed. Significant results were obtained in the course of investigations in the field of synthesis of optimal control of technical systems using invariants, as well as optimal data processing in the radar, navigation systems, and data transmission systems.

результаты.

Области научных интересов доктора технических наук, профессора Р. А. Нейдорфа — теория автоматического управления, математическое и имитационное моделирование, методы оптимизации, эвристические методы экстремальных задач, теория расписаний, теория исследования операций, теория кодирования.

The areas of expertise of Prof. R.A. Neydorf, Dr. Sci. (Eng.), include automatic control theory, mathematical and simulation modeling, optimization techniques, heuristics approaches to extremum problems, scheduling theory, operations research theory, coding theory.


Соболь
Борис Владимирович
Sobol Boris V.


Костоглотов
Андрей Александрович
Kostoglotov Andrey A.


Нейдорф
Рудольф Анатольевич
Neydorf Rudolf A.


Ватульян
Александр Ованесович
Vatulyan Alexander O.

В настоящее время ученые Донского государственного технического университета ведут исследования по широкому спектру направлений. Основная цель большинства научно-исследовательских работ — развитие отечественного машиностроения. Крупнейшие заказчики научных исследований — ОАО «Роствертол», «ПК «НЭВЗ», КЗ «Ростсельмаш», ООО «Прибой», ОАО «ВНИИАЭС» и многие другие предприятия Ростовской области и других регионов России.

Следует отметить, что к научно-исследовательской работе активно привлекаются студенты и аспиранты ДГТУ. Таким образом, формируются высококвалифицированные кадры для научной и производственной деятельности.

Now the researchers of Don State Technical University are conducting investigations on a wide range of areas. The main objective of the most research projects is the development of the national engineering. Major customers of the research are “Rostvertol” JSC, IC “NEVZ” LLC, “Combine Plant “Rostselmash” LLC, “Priboy” LLC, “VNIIAES” JSC, and lots of other enterprises of the Rostov region and other regions of Russia.

It should be noted that the undergraduate and postgraduate students of DSTU are involved in the scientific studies. In that way, highly qualified personnel for research and production activities is formed.

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 519.8 DOI 10.12737/16075

Моделирование трехмерных полей упругих деформаций с помощью метода точечных источников*

С. Ю. Князев[1], В. Н. Пустовойт[2], Е. Е. Щербакова[3], А. А. Щербаков[4]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[4]Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ), г. Новочеркасск, Российская Федерация

Modeling of three-dimensional elastic strain fields by point-source method***

S. Yu. Knyazev[1], V. N. Pustovoyt[2], E. E. Shcherbakova[3], A. A. Shcherbakov[4]**
[1,2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[4]Novocherkassk Electric Locomotive Plant (NEVZ), Novocherkassk, Russian Federation

Целью работы является исследование возможности и эффективности трехмерных численных моделей полей упругих напряжений в деформированных твердых телах. При построении моделей используется метод точечных источников поля (МТИ), называемый в зарубежной литературе методом фундаментальных решений. Описывается построение системы МТИ при моделировании полей различной физической природы. Вводится понятие точечного источника поля упругих смещений в деформированном твердом теле. Результатом работы является построение МТИ системы, которую можно использовать для решения трехмерных задач теории упругости — например, для решения классических первой и второй граничных задач теории упругости (когда на границе заданы либо напряжения, либо смещения), а также смешанной граничной задачи (когда на одной части границы заданы смещения, а на другой — напряжения). Исследуются свойства МТИ при решении стандартной задачи, задачи Дирихле для круговой области. Найдены зависимости погрешности численного решения от параметров задачи — в частности, таких, как число зарядов, моделирующих искомое поле, удаленность зарядов от границ области решения. Решается тестовая задача расчета поля деформаций в шаровой области. На основании полученных результатов делается следующий вывод. При численном решении трехмерных задач теории упругости наблюдается убывающая экспоненциальная зависимость погрешности МТИ от квадратного корня из числа моделирующих зарядов. Это свойство позволяет получить численное решение с весьма низкой относительной погрешностью, что свидетельствует о перспективности использования МТИ при численном решении задач теории упругости, в том числе и при решении трехмерных задач.

Ключевые слова: метод точечных источников, метод фундаментальных решений, задача теории упругости, задача Дирихле.

The work objective is to investigate the possibility and efficiency of three-dimensional numerical models of the elastic stress fields in the deformed solids. The field point-source method (PSM) designated as the method of fundamental solutions (MFS) in the foreign literature is used to develop these models. The PSM system generation for modeling fields of different physical nature is described. The concept of a point source of the elastic displacement field in the deformed solid is introduced. The research result is a developed PSM equations system that can be applied for solving three-dimensional problems in the elasticity theory, including the classical first and second boundary value problems in the elasticity theory (when either the voltage or bias is set on the boundary), as well as a mixed boundary problem (when on one part of the boundary, the displacement is set, and on the other — the voltage). The PSM properties are studied when solving standard problems, and the Dirichlet problem for a circular domain. The dependences of the numerical solution error on the problem parameters, in particular, on such as the charge number simulating the desired field, the remoteness of the charges from the solution domain boundaries, are obtained. The test problem of calculating the deformation field in the ball domain is solved. Upon the results obtained, the following conclusion is made. In the numerical solution of three-dimensional elasticity problems, a decreasing exponential dependence of the PSM error on the square root of the simulating charge number is observed. This property provides a numerical solution with a very low relative error that implies the PSM application perspectiveness in the numerical solution of the elasticity problems, including three-dimensional problems.

Keywords: field Point-Source method, method of fundamental solutions, elasticity problem, Dirichlet problem.

Введение. Расчет полей упругих напряжений в деформированных телах является одной из важнейших задач прикладной математики [1–3]. При численном решении этих задач, в зависимости от их особенностей, применяют различные численные методы: конечных разностей (МКР) [4], граничных элементов (МГЭ) [3]. Однако чаще других использует-

* Работа выполнена по грантам РФФИ 13-07-00952-а и 14-07-00705-а.
** E-mail: ksy@donpac.ru, fipm-dstu@mail.ru, Sherbakovaee@mail.ru, AnSherbakov@mail.ru
*** The research is done on RFFI grants nos. 13-07-00952-a and 14-07-00705-a.

ся метод конечных элементов (МКЭ) [2], который по праву можно считать эталоном для численного решения краевых задач математической физики. Тем не менее в ряде случаев, в том числе при моделировании полей упругих напряжений в деформированных твердых телах, использование МКЭ не всегда эффективно — в частности, точность результата может оказаться ниже требуемой, особенно при решении трехмерных задач. Кроме того, при необходимости получать решение в режиме реального времени с применением МКЭ возможно недостаточное быстродействие вычислений. В указанных случаях возникает необходимость поиска численных методов, позволяющих получать более точное решение за более короткий промежуток времени. В качестве примера приведем метод точечных источников поля (МТИ) [5–9], который может использоваться для решения широкого круга задач математической физики. Его применение наиболее эффективно при решении краевых задач для уравнений эллиптического типа: уравнений Лапласа, Гельмгольца, бигармонических уравнений [8–13]. Имеются сведения об эффективности использования этого метода при решении краевых задач для уравнений параболического типа и для волновых уравнений [8, 14]. В данной статье иллюстрируется возможность применения МТИ при моделировании полей упругих напряжений в деформированных твердых телах. В отличие от статьи [15], в данной работе исследуются возможности применения МТИ при решении трехмерных задач теории упругости. Прежде всего дадим краткое описание МТИ.

Краткое описание МТИ. Пусть в n-мерном Евклидовом пространстве задана область V, ограниченная поверхностью S. В области V определено однородное линейное дифференциальное уравнение в частных производных

$$\hat{L}U = 0\,, \tag{1}$$

а на граничной поверхности S задано условие

$$\hat{l}U\Big|_S = f\,, \tag{2}$$

где $\hat{L}$ и $\hat{l}$ — линейные операторы.

Пусть определена система φ_i линейно независимых решений уравнения (1). Тогда приближенно решение граничной задачи (1)–(2) можно искать в виде

$$U(r) \approx \sum_{i=1}^{N} q_i \varphi_i(r). \tag{3}$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов q_i подставляем (3) в граничное условие (2) и потребуем его выполнения в N узловых точках $\mathbf{r}_j$. В результате для нахождения коэффициентов q_i получается система линейных уравнений

$$\sum_{i=1}^{N} q_i \hat{l} \varphi_i(r_j) = f(r_j). \tag{4}$$

В качестве системы функций φ_i можно использовать фундаментальные решения $\varphi_i = \varphi(r, R_i)$ уравнения (1), соответствующие точкам R_i, расположенным на вспомогательной замкнутой поверхности S_q, целиком охватывающей S и не имеющей с ней (и с V) общих точек. В [5] показано, что при выполнении достаточно общих условий система функций $\varphi(r, R_i)$ обладает свойствами линейной независимости и полноты и ее можно использовать для нахождения приближенного решения граничной задачи (1)–(2) в виде суммы

$$U_N(r) = \sum_{i=1}^{N} q_i\ \varphi(r, R_i). \tag{5}$$

Фундаментальное решение $\varphi(r, R)$ можно рассматривать как потенциал поля, созданного в точке r единичным положительным зарядом, помещенным в точку R, а искомое решение, созданное протяженными, непрерывно распределенными зарядами, представить в виде суперпозиции полей точечных зарядов. Коэффициенты q_i в (5) при этом можно рассматривать как величины точечных зарядов, расположенных на поверхности S_q. Такое физическое истолкование решения граничной задачи способствует удачному выбору вспомогательной поверхности S_q и оптимальному расположению на ней зарядов, что существенно при численном решении. Таким образом, решение краевой задачи сводится к системе линейных уравнений (4). После решения системы (4), называемой системой МТИ, и нахождения зарядов q_i искомое приближенное решение краевой задачи вычисляется с помощью формулы (5).

В [7, 8, 12] показано, что погрешность МТИ e при решении краевых задач для уравнения Лапласа экспоненциально быстро убывает с ростом числа зарядов, моделирующих искомое поле. Например, для двумерной круговой области радиусом r_0, если заряды располагаются на вспомогательной окружности радиусом R, то

$$e \approx E\left(\frac{r_0}{R}\right)^{N/2}.$$

Здесь E — параметр, не зависящий от числа зарядов, моделирующих поле. При решении трехмерных задач наблюдается экспоненциальная зависимость погрешности МТИ от квадратного корня из числа моделирующих зарядов:

$$e \approx E\left(\frac{r_0}{R}\right)^{2\sqrt{\frac{N}{\pi}}} \qquad (6)$$

Моделирование упругих деформаций. Упругие деформации в изотропных телах определяются вектором деформаций $U(r)$, компоненты которого $U_x(x,y,z)$, $U_y(x,y,z)$ и $U_z(x,y,z)$ при отсутствии объемных сил, как известно, удовлетворяют системе трех линейных уравнений эллиптического типа [5, 16]:

$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial x}+\mu\Delta U_x=0,\ (\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial y}+\mu\Delta U_y=0,\ (\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial z}+\mu\Delta U_z=0, \qquad (7)$$

где λ и μ — постоянные Ламе, $\theta=\frac{\partial U_x}{\partial x}+\frac{\partial U_y}{\partial y}+\frac{\partial U_z}{\partial z}$.

Пусть на поверхности S деформированного твердого тела V выполняются граничные условия

$$\sum_{j=1}^{3}\left(\alpha_{ij}U_j+\beta_{ij}\sigma_{nj}\right)=f_i\,. \qquad (8)$$

Здесь α, β, f (с соответствующими индексами) — известные функции точки $(x,y,z)\in V$; σ_{nj} — компоненты тензора напряжений, выраженные с помощью известных соотношений [5] через производные компонент смещения; индексы i и j в зависимости от численного значения соответствуют компонентам x, y или z.

Классические первая и вторая граничные задачи теории упругости, когда на границе S заданы либо напряжения, либо смещения, являются частными случаями граничной задачи (7)–(8) при соответствующих значениях параметров α и β.

При моделировании упругих деформаций используются фундаментальные решения для каждой из трех компонент (x,y,z) вектора $U(r)$. Причем каждой компоненте соответствуют три типа фундаментальных решений и, соответственно, три типа зарядов, моделирующих поле упругих деформаций. Важнейшим параметром фундаментального решения является также координата точки, в которой располагается заряд, создающий поле упругих деформаций. При решении задач теории упругости с помощью МТИ моделирующие заряды находятся в узловых точках R_i (с координатами X_i, Y_i, Z_i; здесь i — номер заряда), расположенных на вспомогательной замкнутой поверхности S_q, целиком охватывающей S и не имеющей с ней (и с V) общих точек. Таким образом, фундаментальные решения определяются тремя параметрами: i — номер узловой точки, j — тип фундаментального решения и заряда (1, 2 или 3) и k — тип компоненты смещения (x, y или z). Каждой из этих совокупностей соответствует свой тип фундаментальных решений и, соответственно, свой тип зарядов, моделирующих поля деформаций, — заряды первого, второго и третьего типов. Например, зарядам первого типа в точке R_i соответствуют фундаментальные решения:

$$\varphi_i^{1x}(r)=n\frac{(x-X_i)^2}{|r-R_i|^3}+\frac{m}{|r-R_i|},\ \varphi_i^{1y}(r)=n\frac{(x-X_i)(y-Y_i)}{|r-R_i|^3},\ \varphi_i^{1z}(r)=n\frac{(x-X_i)(z-Z_i)}{|r-R_i|^3}; \qquad (9)$$

зарядам второго типа:

$$\varphi_i^{2x}(r)=n\frac{(x-X_i)(y-Y_i)}{|r-R_i|^3},\ \varphi_i^{2y}(r)=n\frac{(y-Y_i)^2}{|r-R_i|^3}+\frac{m}{|r-R_i|},\ \varphi_i^{2z}(r)=n\frac{(y-Y_i)(z-Z_i)}{|r-R_i|^3}; \qquad (10)$$

зарядам третьего типа:

$$\varphi_i^{3x}(r)=n\frac{(x-X_i)(z-Z_i)}{|r-R_i|^3},\ \varphi_i^{3y}(r)=n\frac{(y-Y_i)(z-Z_i)}{|r-R_i|^3},\ \varphi_i^{3z}(r)=n\frac{(z-Z_i)^2}{|r-R_i|^3}+\frac{m}{|r-R_i|}. \qquad (11)$$

Здесь $m=(\lambda+3\mu)/(4\pi\lambda\mu(\lambda+2\mu))$, $n=(\lambda+\mu)/(4\pi\lambda\mu(\lambda+2\mu))$.

В соответствии с формулами (9–11) единичный положительный заряд поля смещений первого типа создает в точке своего нахождения бесконечно большое смещение вдоль оси x. При этом в точке, находящейся на единичном расстоянии от заряда в направлении оси x, возникает смещение единичной величины вдоль оси x. Напротив, единичный положительный заряд поля смещений второго типа создает в точке своего нахождения бесконечно большое смещение вдоль оси y. При этом в точке, находящейся на единичном расстоянии от заряда в направлении оси y, возникает смещение вдоль оси y единичной величины. Сходным свойством обладает заряд третьего типа.

Полнота системы функций (9–11) доказанная в [5], позволяет решать граничную задачу (7)–(8) с помощью МТИ. Для этого необходимо найти заряды моделирующих искомое поле упругих напряжений и деформаций путем решения системы МТИ, конкретный вид которой зависит от граничных условий решаемой задачи. Имеются сведения

о применении МТИ к решению задач теории упругости [5, 17–20]. Однако следует признать, что в настоящее время вопросы использования МТИ для моделирования упругих деформаций в твердых телах разработаны весьма слабо.

Рассмотрим первую граничную задачу теории упругости, когда на границе S заданы смещения U_x , U_y и U_z. Эта задача соответствует частному, простейшему случаю граничных условий (8), которые в этом случае принимают вид

$$U_x\big|_S = f_x\,,\; U_y\big|_S = f_y\,,\; U_z\big|_S = f_z\,. \tag{12}$$

Возможны различные варианты построения системы МТИ. Наиболее естественно предположить, что для моделирования упругих деформаций целесообразно использовать одинаковое число N зарядов первого типа q_i^1 (которым соответствуют фундаментальные решения φ^{1x}, φ^{1y} и φ^{1z}), зарядов второго типа q_i^2 и зарядов третьего типа q_i^3. Пусть первые N зарядов — заряды первого типа, а последующие $2N$ зарядов — заряды второго и третьего типов. Учитывая это, в обозначении зарядов можно не указывать их тип, который теперь будет определяться номером заряда, а полное число зарядов будет равняться $3N$.

Положение зарядов, как отмечалось выше, соответствует точкам R_i, расположенным на вспомогательной замкнутой поверхности S_q, целиком охватывающей S и не имеющей с ней (и с V) общих точек. Количество таких точек равно $3N$. Разместим на границе S точки коллокации числом $3N$. В этих точках требуется выполнение граничных условий (12). Теперь систему МТИ (точнее, уравнение системы с номером j) можно записать по аналогии с (4) в виде

$$\sum_{i=1}^{3N} q_i \varphi_{ji} = f_j\,,$$

или более развернуто:

$$\begin{gathered}
\sum_{i=1}^{N} q_i\,\varphi_i^{1x}(r_j) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i\varphi_i^{2x}(r_j) + \sum_{i=2N+1}^{3N} q_i\,\varphi_i^{3x}(r_j) = f_x(r_j) \text{ для } j \le N\,;\\
\sum_{i=1}^{N} q_i\,\varphi_i^{1y}(r_j) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i\,\varphi_i^{2y}(r_j) + \sum_{i=2N+1}^{3N} q_i\varphi_i^{3y}(r_j) = f_y(r_j) \text{ для } N < j \le 2N\,;\\
\sum_{i=1}^{N} q_i\varphi_i^{1z}(r_j) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i\varphi_i^{2z}(r_j) + \sum_{i=2N+1}^{3N} q_i\varphi_i^{3z}(r_j) = f_z(r_j) \text{ для } j > 2N\,.
\end{gathered} \tag{13}$$

Здесь использованы следующие обозначения:

для $j \le N$ $f_j = f_x(r_j)$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{1x}(r_j)$, если $i \le N$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{2x}(r_j)$, если $2N \ge i > N$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{3x}(r_j)$ $\varphi_{ji} = \varphi_i^{3x}(r_j)$, если $i > 2N$;

для $2N \ge j > N$ $f_j = f_y(r_j)$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{1y}(r_j)$, если $i \le N$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{2y}(r_j)$, если $2N \ge i > N$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{3y}(r_j)$, если $i > 2N$;

для $j > 2N$ $f_j = f_z(r_j)$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{1z}(r_j)$, если $i \le N$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{2z}(r_j)$, если $2N \ge i > N$ $2N \ge i > N$, $\varphi_{ji} = \varphi_i^{3z}(r_j)$, если $i > 2N$.

После решения системы (13) и нахождения зарядов q_i приближенные значения поля смещений в объеме деформированного тела вычисляются с помощью формул

$$\begin{gathered}
U_x(r) \approx \sum_{i=1}^{N} q_i\,\varphi_i^{1x}(r) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i\,\varphi_i^{2x}(r) + \sum_{i=2N+1}^{3N} q_i\,\varphi_i^{3x}(r)\,,\\
U_y(r) \approx \sum_{i=1}^{N} q_i\,\varphi_i^{1y}(r) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i\,\varphi_i^{2y}(r) + \sum_{i=2N+1}^{3N} q_i\,\varphi_i^{3y}(r)\,,\\
U_z(r) \approx \sum_{i=1}^{N} q_i\,\varphi_i^{1z}(r) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i\,\varphi_i^{2z}(r) + \sum_{i=2N+1}^{3N} q_i\varphi_i^{3z}(r)\,.
\end{gathered} \tag{14}$$

Затем, используя соответствующие аналитические выражения, можно вычислить компоненты тензора деформаций. При этом, как отмечалось выше, дополнительная численная ошибка не возникает.

Аналогичным образом решается вторая граничная задача теории упругости, или смешанная граничная задача, когда на одной части границы заданы смещения, а на другой — напряжения. В этом случае вид системы МТИ (13) изменяется.

Решение стандартной задачи МТИ для полей упругих деформаций. Важнейшей характеристикой численных методов (в том числе и МТИ) является погрешность полученного с их помощью решения. При этом погрешность зависит от параметров задачи — например, от конфигурации области решения, от числа зарядов, моделирующих поле, от их расположения вокруг области решения и т. д. В общем случае получить такие зависимости весьма затруднительно. По-

этому исследование зависимости погрешности от параметров численной модели начнем с простейших случаев МТИ с последующим усложнением задачи.

В ряде публикаций производится оценка погрешности МТИ при решении двумерной задачи Дирихле для круговой области [8–13]. В трехмерном случае удобно использовать шарообразную область решения. Назовем задачу Дирихле для шаровой области стандартной трехмерной задачей МТИ. Приведем здесь результаты анализа численного решения этой задачи.

Так как для любого поля упругих деформаций, ввиду линейности уравнений (7), справедлив принцип суперпозиции, то его можно представить в виде наложения полей точечных источников. Поэтому при исследовании погрешности МТИ важнейшее значение имеет задача нахождения поля, созданного одним точечным зарядом, и оценка погрешности для этого поля.

Пусть искомое поле есть поле смещения, созданное единичным положительным зарядом первого типа, помещенным в точку с радиус-вектором ρ и Декартовыми координатами (ρ, 0, 0). Тогда в соответствии с (9–11) искомое поле будет описываться соотношениями

$$u_x(r)=n\frac{(x-\rho)^2}{|r-\rho|^3}+\frac{m}{|r-\rho|},\ u_y(r)=n\frac{(x-\rho)y}{|r-\rho|^3},\ u_z(r)=n\frac{(x-\rho)z}{|r-\rho|^3}. \qquad (15)$$

Область решения представляет собой шар радиусом $r_0 = 2$. Заряды, моделирующие искомое поле, равномерно располагаются на вспомогательной сфере радиусом R. Количество зарядов каждого типа полагается равным N. Полное число зарядов $N_q = 3N$. Аналогично на границе области решения S, т. е. на сфере радиусом r_0, равномерно располагаются узловые точки, точки коллокации. Полное число зарядов и точек коллокации может не совпадать [8]. Тогда систему МТИ получают методом наименьших квадратов. Однако здесь применяется наиболее часто используемый и проверенный вариант МТИ, когда каждому заряду на вспомогательной сфере соответствует заряд на границе S. При этом допускается совпадение положения зарядов первого, второго и третьего типов и соответствующих им точек коллокации.

Погрешность МТИ в каждой точке области решения граничной задачи определяется величиной

$$\varepsilon(r)=max(|\varepsilon_x(r)|,|\varepsilon_y(r)|,|\varepsilon_z(r)|),$$

где $\varepsilon_x(r)=U_x(r)-u_x(r)$, $\varepsilon_y(r)=U_y(r)-u_y(r)$, $\varepsilon_z(r)=U_z(r)-u_z(r)$.

Так как функции $U_x(r), u_x(r), U_y(r), u_y(r), U_z(r), u_z(r)$ удовлетворяют однородным эллиптическим уравнениям (7), то и функции $\varepsilon_x(r), \varepsilon_y(r), \varepsilon_z(r)$ также удовлетворяют этим уравнениям, а, следовательно, своего максимального и минимального значения достигают на границе S. Поэтому в качестве относительной погрешности МТИ может использоваться величина

$$e=\frac{\varepsilon_{max}}{u_{max}}, \qquad (16)$$

где $\varepsilon_{max}=\varepsilon(r)|_S$, $u_{max}=\max_{r\in S}(|u_x(r)|,|u_y(r)|,|u_z(r)|)$.

На рис. 1 приведены графики зависимости относительной погрешности МТИ e от количества зарядов первого типа N (равного количеству зарядов второго и третьего типов). При расчетах полагалось, что искомое поле — это поле точечного заряда первого типа, расположенного на оси x, удаленной от центра области V на расстояние $\rho = 2r_0$.

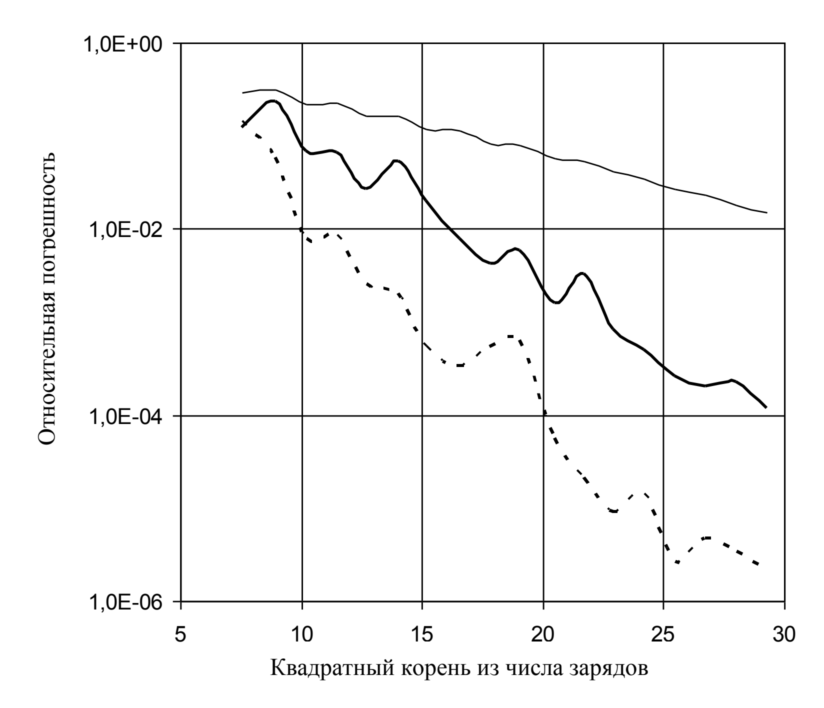


Рис. 1. Зависимость погрешности МТИ от количества зарядов, моделирующих искомое поле для разных значений *R*

Тонкая сплошная линия рассчитана при радиусе вспомогательной окружности $R = 1{,}1r_0$. На рис. 1 представлены также зависимости, рассчитанные при $R = 1{,}3r_0$ (жирная сплошная линия) и при $R = 1{,}7r_0$ (пунктирная линия). При расчетах использовались следующие значения постоянных Ламе: $\lambda = 0{,}5$; $\mu = 0{,}25$.

Из рис. 1 видна экспоненциальная зависимость погрешности МТИ от квадратного корня из числа моделирующих зарядов. Это качественно согласуется с полученной теоретически оценкой погрешности МТИ при решении задачи Дирихле для уравнения Лапласа (6).

Наблюдается не только качественное, но и некоторое количественное соответствие погрешности данных, представленных на рис. 1, с формулой (6). Действительно, запишем зависимость (6) приближенно в виде формулы $\varepsilon \approx EN\left(\frac{r_0}{R}\right)^{1{,}12\sqrt{N}}$. С другой стороны, зависимость погрешности от числа зарядов, соответствующая значению $R = 1{,}1r_0$ (тонкая сплошная линия на рис. 1), аппроксимируется формулой $\varepsilon = 0{,}32N\left(\frac{r_0}{R}\right)^{2{,}72\sqrt{N}}$. Для значений $R = 1{,}3r_0$ (жирная сплошная линия) и $R = 1{,}7r_0$ (пунктирная линия) эти зависимости аппроксимируются формулами $\varepsilon = 0{,}100N\left(\frac{r_0}{R}\right)^{1{,}79\sqrt{N}}$ и, соответственно, $\varepsilon = 0{,}077N\left(\frac{r_0}{R}\right)^{0{,}86\sqrt{N}}$.

Как видно, различия между теоретической зависимостью (6) и аппроксимирующими зависимостями, полученными из результатов численных экспериментов, незначительны.

При решении задач теории упругости необходимо учитывать, что одним из основных параметров, определяющих точность численного решения, является удаленность зарядов, моделирующих искомое поле, от границы области решения. В данном случае при решении стандартной задачи МТИ этим параметром является *R*.

На рис. 2 приведены графики зависимости относительной погрешности МТИ *e* от относительной удаленности зарядов, моделирующих поле, равной $\Delta R = 10\,(R - r_0)/r_0$.

Рис. 2. Зависимость погрешности МТИ от удаленности моделирующих зарядов от границы области решения ΔR

Зависимости, представленные на рис. 2, получены при $\rho = 2r_0$ и трех различны значениях N: $N = 80$ (тонкая сплошная линия), $N = 196$ (жирная сплошная линия) и $N = 362$ (пунктирная линия).

Из рис. 2 видно, что при малых значениях удаленности моделирующих зарядов ΔR погрешность МТИ убывает с увеличением ΔR, причем это убывание происходит тем быстрее, чем больше число моделирующих зарядов. Это хорошо согласуется с оценкой (6). При относительно больших значениях ΔR наблюдается замедление убывания погрешности решения с увеличением удаленности моделирующих зарядов. Отмечается даже тенденция к росту погрешности МТИ при больших значениях ΔR. Это особенно заметно по пунктирной кривой на рис. 2, полученной при $N = 362$. Такое поведение погрешности МТИ, возможно, объясняется сильной зависимостью числа обусловленности матрицы системы МТИ от числа моделирующих зарядов. При относительно больших значениях ΔR число обусловленности системы МТИ резко возрастает, что может приводить к значительному увеличению погрешности округления численного решения.

Для МТИ характерно экспоненциально быстрое возрастание числа обусловленности системы МТИ с ростом размерности системы, т. е. с увеличением числа моделирующих зарядов N [7]. Эту особенность МТИ при решении задач теории упругости иллюстрирует рис. 3. Графики на рис. 3 построены при тех же параметрах МТИ, что и графики на рис. 1 — т. е. при $\rho = 2r_0$, $R = 1{,}1r_0$ (тонкая сплошная линия), $R = 1{,}3r_0$ (жирная сплошная линия) и при $R = 1{,}7r_0$ (пунктирная линия).

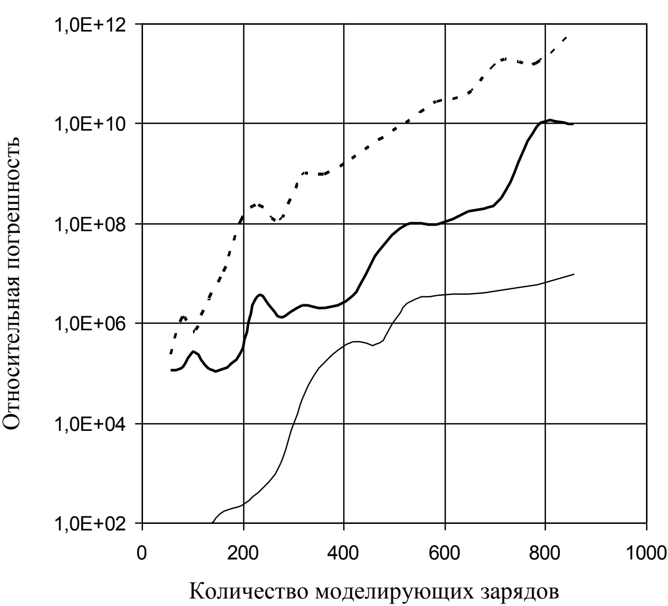


Рис. 3. Зависимость числа обусловленности системы МТИ от количества зарядов, моделирующих искомое поле

Из рис. 3 видно, что число обусловленности системы МТИ *C* может изменяться в весьма широком интервале — от нескольких единиц до 10^{12} и более. Так как отдельные вычислительные операции не могут быть выполнены на компьютере абсолютно точно, а производятся с относительной погрешностью ε, то при решении системы МТИ возникает относительная погрешность округления $e \le C\varepsilon$. Погрешность ε, обусловленная ограниченностью представления вещественных чисел на компьютере, при использовании чисел типа *double* имеет значение порядка 10^{-14}. Это предельная точность вычислений на обычных компьютерах. В некоторых случаях, например при моделировании двумерных полей упругих деформаций с помощью МТИ, такая предельно высокая точность вычислений может быть достигнута [15], что вполне типично. Высокая точность вычислений достигается, несмотря на большие значения чисел обусловленности ($C > 10^{10}$ для $R = 1{,}7r_0$). Более того, весьма часто точность результата бывает тем выше, чем больше число обусловленности [21–23]. В ряде публикаций исследуются причины такой особенности [22]. Тем не менее, большие значения чисел обусловленности системы МТИ чаще приводят к существенному снижению точности результата. Именно этим в значительной степени объясняются некоторая немонотонность и колебания представленных на рис. 1–3 зависимостей.

Пример решения тестовой задачи. В качестве примера рассмотрим решение тестовой задачи [5]. Область решения является шаром единичного радиуса. Граничные значения на сфере имеют вид

$$f_x = 2 + 3\cos 2\theta,\ f_y = 2 + 3\cos 2\theta,\ f_z = -1 + 3\cos 2\theta,$$

где θ — полярный угол.

Точное решение этой задачи при $\dfrac{\mu}{\lambda + 2\mu} = 0{,}25$ имеет вид

$$U_x(x,y,z) = 5z^2 - x^2 - y^2,\ U_y(x,y,z) = 5z^2 - x^2 - y^2,\ U_z(x,y,z) = 2z^2 - 4\left(x^2 + y^2\right)^2.$$

На рис. 4 представлены зависимости погрешности решения этой задачи от квадратного корня из числа моделирующих зарядов, полученные при $R = 1{,}1r_0$ (тонкая сплошная линия на рис. 4), $R = 1{,}3r_0$ (жирная сплошная линия) и $R = 1{,}7r_0$ (пунктирная линия).

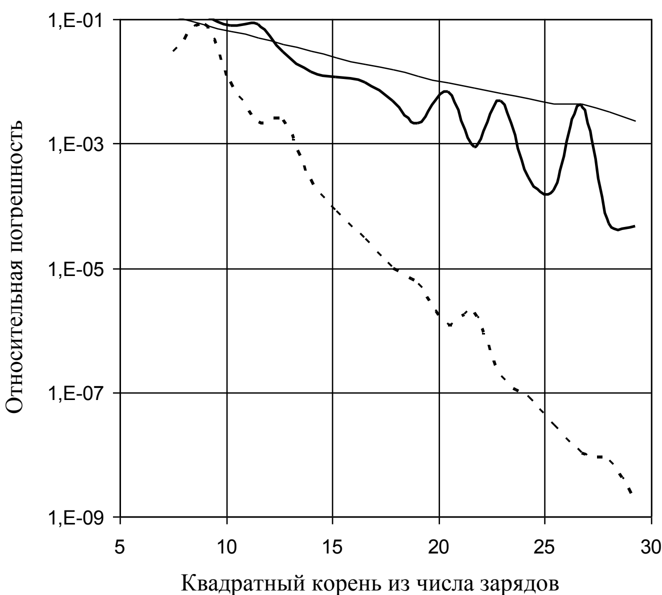


Рис. 4. Зависимость погрешности решения тестовой задачи от количества зарядов, моделирующих искомое поле, для разных значений *R*

Как видно из рис. 4, полученные результаты весьма близки к зависимостям, представленным на рис. 1. Этого следовало ожидать, так как, в соответствии с изложенным выше, поле практически любой задачи теории упругости можно с необходимой точностью представить в виде суперпозиции полей точечных зарядов.

Заключение. Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования МТИ при моделировании полей упругих деформаций в твердом теле даже при решении трехмерных задач. Исследована зависимость погрешности от параметров системы при решении стандартной задачи МТИ для шаровой области. Полученные результаты, как показали дополнительные численные эксперименты, оказались в качественном и (частично) количественном соответствии с результатами теоретических исследований свойств решения задачи Дирихле.

При практической реализации МТИ следует подобрать наиболее эффективное значение удаленности ΔR моделирующих зарядов от границы области решения. Здесь необходимо учитывать, что, чем ближе моделирующие заряды к границе, тем выше погрешность МТИ, но зато меньше число обусловленности системы МТИ и, соответствен-

но, устойчивее решение. Напротив, с удалением моделирующих зарядов от границы области решения точность МТИ повышается, но одновременно увеличивается значение числа обусловленности, что может привести к повышению результирующей погрешности и даже к неустойчивости решения. Наиболее эффективное значение удаленности ΔR можно подобрать в ходе численного эксперимента. Для трехмерного случая это значение близко к $\Delta R = 0{,}7r_0$.

Библиографический список

1. Победря, Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности / Б. Е. Победря. — 2-е изд. — Москва : Изд-во МГУ, 1995. — 366 с.

2. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. — Москва : Мир, 1986. — 318 с.

3. Бреббия, К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Телес, Л. Вроубел. — Москва : Мир, 1987. — 524 с.

4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. — Москва : Наука, 1989. — 616 с.

5. Алексидзе, М. А. Фундаментальные функции в приближенных решениях граничных задач / М. А. Алексидзе. — Москва : Наука, 1991. — 352 с.

6. Бахвалов, Ю. А**.** Математическое моделирование физических полей методом точечных источников / Ю. А. Бахвалов, С. Ю. Князев, А. А. Щербаков // Изв. РАН. Сер. физическая. — 2008. — Т. 72, № 9. — С. 1259—1261.

7. Князев, С. Ю. Устойчивость и сходимость метода точечных источников поля при численном решении краевых задач для уравнения Лапласа / С. Ю. Князев // Изв. вузов. Электромеханика. — 2010. — № 3. — С. 3–12.

8. Fairweather, G. The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems / G. Fairweather, A. Karageorghis // Advances in Computational Mathematics. — 1998. — Vol. 9. — P. 69–95.

9. Golberg, M. A. The method of fundamental solutions for potential, Helmholtz and diffusion problems / M. A. Golberg, C. S. Chen // Boundary Integral Methods — numerical and mathematical aspects. — Southampton : Computational Mechanics Publication. — 1998. — P. 103–176.

10. Bogomolny, A. Fundamental solutions method for elliptic boundary value problems / A. Bogomolny // SIAM Journal on Numerical Analysis. — 1985. — Vol. 22, № 4. — P. 644–669.

11. Fairweather, G. The method of fundamental solutions for problems in potential theory / G. Fairweather, R. - L. Johnston // Treatment of Integral Equations by Numerical Methods. — London : Academic Press, 1982. — P. 349–359.

12. Katsurada, M. The collocation points of the method of fundamental solutions for the potential problem / M. Katsurada, H. Okamoto // Computers & Mathematics with Applications. — 1996. — Vol. 31. — P. 123–137.

13. Князев, С. Ю. Решение граничных задач математической физики методом точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Изв. вузов. Электромеханика. — 2007. — № 3. — С. 11–15.

14. Князев, С. Ю. Решение задач тепло- и массопереноса с помощью метода точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Изв. вузов. Электромеханика. — 2006. — № 4. — С. 43–47.

15. Князев, С. Ю. Моделирование полей упругих деформаций с применением метода точечных источников / С. Ю. Князев, В. Н. Пустовойт, Е. Е. Щербакова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15. — № 1 (80). — С. 29–38.

16. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. В 10 т. Т. VII. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Москва : Наука, 1987. — 248 с.

17. Patterson, C. On the use of fundamental solutions in Trefftz method for potential and elasticity problems / C. Patterson, M. A. Sheikh // Boundary Element Methods in Engineering. — Berlin : Springer, 1982. — P. 973–980.

18. Redekop, D. Fundamental solutions for the collocation method in three-dimensional elastostatics / D. Redekop, R.-S.-W. Cheung // Computers & Structures. — 1987. — Vol. 26. — P. 703–707.

19. Yan Gu. Improved singular boundary method for elasticity problems / Yan Gu, Wen Chen, Xiaoqiao He // Computers & Structures. — 2014. — Vol. 135. — P. 7–82.

20. Marin, L. The MFS–MPS for two-dimensional steady-state thermoelasticity problems / L. Marin, A. Karageorghis // Engineering Analysis with Boundary Elements Journal Impact Factor & Information. — 2013. — Vol. 37, iss. 7–8. — P. 1004–1020.

21. Christiansen, S. Condition number of matrices derived from two classes of integral equations / S. Christiansen // Mathematical Methods in the Applied Sciences. — 1981. — Vol. 3. — P. 364–392.

22. Drombosky, T. W. Applicability of the method of fundamental solutions / T. W. Drombosky, A. L. Meyer, L. Ling // Engineering Analysis with Boundary Elements. — 2009. — Vol. 33. — P. 637–643.

23. Smyrlis, Y.-S. Some aspects of the method of fundamental solutions for certain harmonic problems / Y.-S. Smyrlis, A. Karageorghis // Journal of Scientific Computing. — 2001. — Vol. 16 (3). — P. 341–371.

References

1. Pobedrya, B.E. Chislennye metody v teorii uprugosti i plastichnosti. [Numerical methods in the elasticity and plasticity theory.] 2nd ed. Moscow: Izd-vo MGU, 1995, 366 p. (in Russian).

2. Zenkevich, O., Morgan, K. Konechnye elementy i approksimatsiya. [Finite Elements and Approximation.] Moscow: Mir, 1986, 318 p. (in Russian).

3. Brebbia, C., Telles, J., Wrobel, L. Metody granichnykh elementov. [Boundary Element Techniques.] Moscow: Mir, 1987, 524 p. (in Russian).

4. Samarskiy, A.A. Teoriya raznostnykh skhem. [Difference scheme theory.] Moscow: Nauka, 1989, 616 p. (in Russian).

5. Aleksidze, M.A. Fundamental'nye funktsii v priblizhennykh resheniyakh granichnykh zadach. [Fundamental functions in approximate solutions of boundary value problems.] Moscow: Nauka, 1991, 352 p. (in Russian).

6. Bakhvalov, Yu.A., Knyazev, S.Yu., Shcherbakov, A.A. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh poley metodom tochechnykh istochnikov. [Mathematical Modeling of Physical Fields by the Point-Source Method.] Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2008, vol. 72, no. 9, pp. 1259—1261 (in Russian).

7. Knyazev, S.Yu. Ustoychivost' i skhodimost' metoda tochechnykh istochnikov polya pri chislennom reshenii kraevykh zadach dlya uravneniya Laplasa. [Stability and convergence of the field point-source method in the numerical solution to boundary value problems for the Laplace equation.] Izvestia. Electromechanics. 2010, no. 3, pp. 3–12 (in Russian).

8. Fairweather, G., Karageorghis, A. The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems. Advances in Computational Mathematics, 1998, vol. 9, pp. 69–95.

9. Golberg, M.A., Chen, C.S. The method of fundamental solutions for potential, Helmholtz and diffusion problems. Boundary Integral Methods — numerical and mathematical aspects. Southampton: Computational Mechanics Publication, 1998, pp. 103–176.

10. Bogomolny, A. Fundamental solutions method for elliptic boundary value problems. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1985, vol. 22, no. 4, pp. 644–669.

11. Fairweather, G., Johnston, R.-L. The method of fundamental solutions for problems in potential theory. Treatment of Integral Equations by Numerical Methods. London: Academic Press, 1982, pp. 349–359.

12. Katsurada, M., Okamoto, H. The collocation points of the method of fundamental solutions for the potential problem. Computers & Mathematics with Applications, 1996, vol. 31, pp. 123–137.

13. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E. Reshenie granichnykh zadach matematicheskoy fiziki metodom tochechnykh istochnikov polya. [Solution of boundary value problems of mathematical physics by the field Point-Source method.] Izvestia. Electromechanics. 2007, no. 3, pp. 11–15 (in Russian).

14. Knyazev, S.Yu., Shcherbakova, E.E. Reshenie zadach teplo- i massoperenosa s pomoshch'yu metoda tochechnykh istochnikov polya. [Solution to the problems of heat and mass transfer by the field point-source method.] Izvestia. Electromechanics. 2006, no. 4, pp. 43–47 (in Russian).

15. Knyazev, S.Yu., Pustovoyt, V.N., Shcherbakova, E.E. Modelirovanie poley uprugikh deformatsiy s primeneniem metoda tochechnykh istochnikov. [Modeling the elastic strain fields by point-source method.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 1 (80), pp. 29–38 (in Russian).

16. Landau, L.D., Lifshits, E.M. Teoreticheskaya fizika. V 10 t. T. VII. Teoriya uprugosti. [Theoretical Physics. In 10 vol. Vol. VII. Elasticity theory.] Moscow: Nauka, 1987, 248 p. (in Russian).

17. Patterson, C., Sheikh, M.A. On the use of fundamental solutions in Trefftz method for potential and elasticity problems. Boundary Element Methods in Engineering. Berlin: Springer, 1982, pp. 973–980.

18. Redekop, D., Cheung, R.-S.-W. Fundamental solutions for the collocation method in three-dimensional elastostatics. Computers & Structures, 1987, vol. 26, pp. 703–707.

19. Yan Gu, Wen Chen, Xiaoqiao He. Improved singular boundary method for elasticity problems. Computers & Structures, 2014, vol. 135, pp. 7–82.

20. Marin, L., Karageorghis, A. The MFS–MPS for two-dimensional steady-state thermoelasticity problems. Engineering Analysis with Boundary Elements Journal Impact Factor & Information, 2013, vol. 37, iss. 7–8, pp. 1004–1020.

21. Christiansen, S. Condition number of matrices derived from two classes of integral equations. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 1981, vol. 3, pp. 364–392.

22. Drombosky, T.W., Meyer, A.L., Ling, L. Applicability of the method of fundamental solutions. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2009, vol. 33, pp. 637–643.

23. Smyrlis, Y.-S., Karageorghis, A. Some aspects of the method of fundamental solutions for certain harmonic problems. Journal of Scientific Computing, 2001, vol. 16 (3), pp. 341–371.

Поступила в редакцию 26.05.2015

Сдана в редакцию 26.05.2015

Запланирована в номер 24.09.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.182.12 DOI 10.12737/16069

Электролитические свойства растворов угольной кислоты и инновационные методы оперативного контроля качества вод типа конденсата на ТЭС*

В. Н. Щербаков[1**]
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Electrolytic properties of carbonic acid solutions and innovative methods of operational control of water quality such as condensation at TPP***

V. N. Shcherbakov[1**]
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является совершенствование оперативного кондуктометрического контроля качества пара на ТЭС. Для этого разработана методика определения концентраций CO_2 в паре при нейтральном водно-химическом режиме без дозирования аммиака. Использован метод измерений электропроводности конденсата пара при рабочих давлениях парогенераторов и различных температурах. Реализация данного метода с помощью специального устройства обеспечила значительное снижение инерционности контроля и дифференцирование примесей. Проанализированы экспериментальные данные о первых кажущихся константах диссоциации и предельной эквивалентной электропроводности угольной кислоты, константах диссоциации и предельной эквивалентной электропроводности NaCl в жидкой фазе на линии насыщения. На основании данного анализа оценена погрешность определения предложенным методом концентраций CO_2 и примесей в паре в виде NaCl. Рассчитана погрешность аппроксимации для зависимостей, описывающих поведение констант диссоциации и предельной эквивалентной электропроводности угольной кислоты, которые могут быть использованы при расчете концентраций по предложенной методике, а также при организации и ведении водно-химических режимов.

The work objective is to improve the operational conductometric vapor quality control at the thermal power plants. To this end, methods identifying CO_2 concentrations in the vapor under the neutral aqueous-chemical mode without ammonia addition are developed. The technique of measuring the steam condensate conductivity at the operating pressures of steam generators and at different temperatures is used. The implementation of this method with the use of a special device significantly reduces the control response rate and differentiation of impurities. The experimental data on the first apparent dissociation constants and the limiting equivalent conductance of the carbonic acid, dissociation constants, and the limiting equivalent conductance of NaCl in the liquid phase on the saturation line are analyzed. On the basis of this analysis, an error in determining CO_2 concentration and the impurities in vapor in the form of NaCl by the proposed method is estimated. The approximation error for the dependencies describing the dissociation constants behavior, and the limiting equivalent conductance of the carbonic acid, which can be used in the calculation of the concentrations by the proposed methodology, as well as during the organization and management of water chemistry, is estimated.

Ключевые слова: оперативный контроль, качество пара, кондуктометрические методы, угольная кислота, электролитические свойства.

Keywords: operational control, steam quality, conductometric methods, carbonic acid, electrolytic properties.

Введение. При организации и ведении водно-химического режима (ВХР) на ТЭС основными задачами являются замедление процессов коррозии конструкционных материалов и образования отложений в пароводяном тракте энергетических установок [1]. Снижение pH растворов и усиление коррозионных процессов определяются наличием в питательной воде и паре котельных установок угольной кислоты, следовательно, ее содержание необходимо свести к минимуму [1, 2].

---

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: vladnik48@aaanet.ru
***The research is done within the frame independent R&D.

Причинами нарушения норм ВХР могут быть:
— присосы охлаждающей воды в конденсаторах турбин;
— растворение в конденсате CO_2, содержащегося в воздухе;
— попадание в конденсатно-питательный тракт потенциально кислых веществ, разлагающихся при высоких температурах *T* с образованием CO_2 [3 ,4].

В настоящее время на станциях оперативный контроль качества вод типа конденсата осуществляется путем анализа охлажденных до T = 298,15К проб, отобранных из контрольных точек.

Авторы [3, 5] предложили новый метод оперативного контроля примесей в конденсатах, позволяющий упростить существующую методику контроля. Суть метода заключается в следующем. Определяется концентрация примесей *C* путем измерения pH, *T* и удельной электропроводности χ охлажденных проб до и после катионообменного фильтра и решаются уравнения, соответствующие математическим моделям ионных равновесий в водных растворах. Значения концентраций примесей в виде ионов Cl^-, Na^+, HCO_3^- и свободной углекислоты получаются на основании анализа уравнений электронейтральности, электрической проводимости, баланса углекислоты до и после Н-фильтра, диссоциации углекислоты по первой ступени.

Но анализ охлажденных проб предполагает наличие устройств отбора, транспортирования, снижения давления и охлаждения пробы. Такая методика связана со значительным транспортным запаздыванием пробы. Это негативно влияет на достоверность полученных результатов и возможность быстрого реагирования в случае внезапного резкого изменения контролируемых параметров в потоке пара.

Значительно уменьшить инерционность процесса измерения и исключить необходимость в пробоотборных линиях и устройствах подготовки пробы позволяет метод контроля, заключающийся в измерении χ конденсата контролируемого пара в кондуктометрической ячейке охлаждаемого датчика, размещенного в потоке пара [6–9]. При этом С примесей в паре определяют из зависимости $C = f(\chi)$ [6, 10]. Однако в работах [6, 10] отсутствует подробный анализ возможностей метода для условий, когда в паре энергоблоков с нейтральным ВХР без дозирования аммиака присутствуют примеси в виде диоксида углерода и NaCl. Не была детально разработана и методика определения *C* на основании данных о χ водных растворов CO_2 с учетом наблюдаемых на станциях реальных значений *C* и особенностей изменения χ с температурой.

Целью настоящей работы является совершенствование метода определения концентрации примесей в паре, основанного на измерении χ конденсата пара охлаждаемым датчиком [8], и оценка погрешности определения *C* примесей в конденсате пара, содержащем только CO_2 и NaCl в количестве, характерном для ТЭС при нейтральном ВХР без дозирования аммиака.

Для достижения поставленной цели:
— решены задачи, связанные с анализом изменения первых кажущихся констант диссоциации K_{d1} и предельной эквивалентной электропроводности Λ_o угольной кислоты и Λ_o NaCl в жидкой фазе на линии насыщения;
— разработаны методики определения χ на основании данных о K_{d1} и Λ_o для угольной кислоты и определения *C* на основании данных о χ;
— выполнена оценка погрешности аппроксимации для данных о K_{d1} и Λ_o угольной кислоты.

Анализ экспериментальных данных. Для решения поставленных задач были использованы экспериментальные данные авторов [6, 11–16] о K_{d1} и Λ_o для угольной кислоты и данные о Λ_o для NaCl [11]. Анализ зависимости K_{d1} от *T* на линии насыщения в жидкой фазе, представленной на рис. 1, показывает, что в диапазоне изменения Т от 298 до 323К K_{d1} возрастает от $4{,}45 \cdot 10^{-7}$ до $5{,}19 \cdot 10^{-7}$ [11], а затем уменьшается до $3{,}6 \cdot 10^{-7}$ при 373К и до $1{,}81 \cdot 10^{-9}$ при 593К [6]. Причем с увеличением *T* K_{d1} уменьшается все сильнее. Если при увеличении *T* от 373 до 473К K_{d1} уменьшается в 2,46 раза [6], то при увеличении *T* от 473 до 573 и до 593К — уже в 14,4 и в 36 раз соответственно. Следует отметить, что на рис. 1 представлены далеко не все экспериментальные данные о K_{d1}, известные из литературных источников. Это объясняется тем, что разные авторы рассматривают близко расположенные показатели, и графически изобразить такие данные сложно.

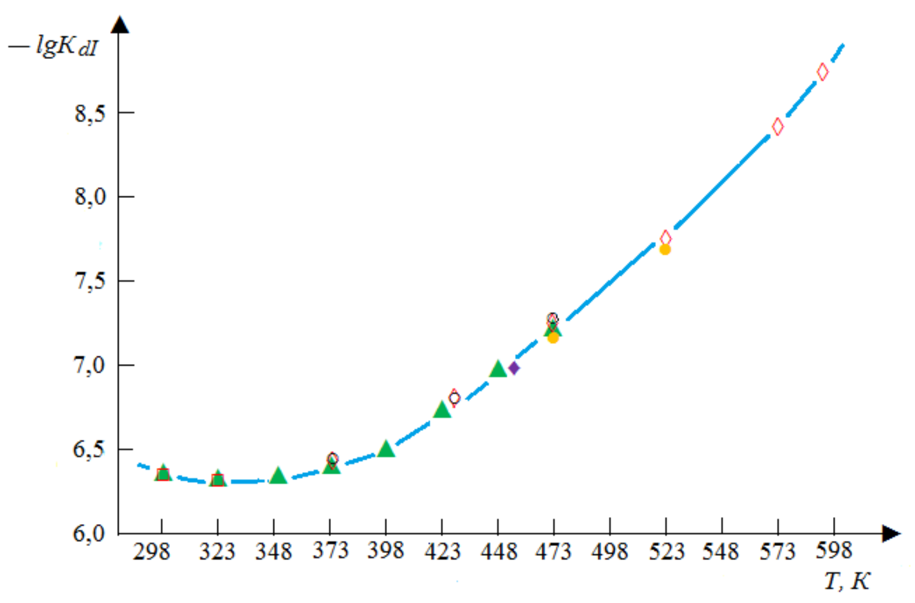


Рис. 1. Зависимость первых констант диссоциации угольной кислоты от температуры:
◊ — [6]; □ — [11]; ▲ — [14]; ○ — [15]; ● — [16]; ♦ — [21]

В качестве примеров могут быть приведены работы Диксона и Миллеро [17] (*T* = 273–308К), Шедловского и Маккейна [18] (273–311К), Харнеда и Боннера [19] (273–323К), Накаямы [20] (273–323К), Пака, Кима и Ли [21] (298–448К), Миллеро, Хуанга, Грэхэма и Пиеррота [22] (273–323К), Петтерсона, Слокума, Бассэя и Месмера [23], Ли и Дуана [24]. Данные авторов [23, 24] представлены в виде математической модели для зависимости K_{dI} от *T*.

Методика определения χ и С. Значения χ высокоразбавленных растворов NaCl и CO_2 определялись путем расчета с использованием данных о K_{dI} и Λ_o [6, 11–13]. На основании анализа данных о K_d, Λ_o и степеней диссоциации α для NaCl в рассматриваемой области изменения *P, T, C* при выполнении оценочных расчетов полагали, что

$$\Lambda\ NaCl = \Lambda_o\ NaCl \text{ и } \chi\ NaCl = \Lambda_o\ NaCl \cdot C \cdot \rho/\rho_{ну} \cdot 10^{-3},$$

где *C* — концентрация раствора в кг-экв/м³; ρ — плотность раствора при *T* опыта; $\rho_{ну}$ — плотность раствора при нормальных условиях.

Для нахождения χ растворов H_2CO_3 значения α определяли из уравнения

$$K_{dI} = \alpha^2 \cdot C \cdot f^2/(1 - \alpha),$$

где *f* — средний коэффициент активности.

Величину f рассчитывали по уравнению Дебая [12]. Значения эквивалентной электропроводности Λ находили из соотношения

$$\alpha = \Lambda / \Lambda_i\ .$$

Здесь Λ_i — эквивалентная электропроводность гипотетически полностью диссоциированного раствора при концентрации $\alpha^1 \cdot C$, где $\alpha^1 = \Lambda/\Lambda_o$. Величину Λ_i определяли по уравнению Робинсона — Стокса [25], а χ для растворов H_2CO_3 — из соотношения между χ и Λ: $\chi = \Lambda \cdot C \cdot \rho/\rho_{ну} \cdot 10^{-3}$.

При оценке вклада χ NaCl и вклада χ H_2CO_3 в суммарную удельную электропроводность раствора $\chi_{сум.}$ учитывался характер изменения χ NaCl и χ H_2CO_3 при изменении температуры. Результаты расчетов для температур 323,15 и 373,15К и *C* CO_2, равных 50, 500 и 5000 мкг/кг при *C* Na = 5 мкг/кг, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вклад NaCl в суммарную удельную электропроводность конденсата пара, содержащего NaCl и CO_2, и отношение χ NaCl / χ CO_2

T, К	*C* Na = 5 мкг/кг					
	C CO_2 = 50 мкг/кг		*C* CO_2 = 500 мкг/кг		*C* CO_2 = 5000 мкг/кг	
323,15	0,120*	0,138**	0,0336*	0,0347**	0,0101*	0,0102**
373,15	0,166*	0,199**	0,0495*	0,0520**	0,0152*	0,0154**
*$\delta_1 = \chi$ NaCl / $\chi_{сум}$; **$\delta_2 = \chi$ NaCl / χ CO_2						

Значение *C* Na = 5 мкг/кг выбрано исходя из допустимых максимальных предельных величин, соответствующих правилам технической эксплуатации котельных агрегатов [2]. Как видно из табл. 1, $\delta_2 = \chi$ NaCl / χ CO_2 намного меньше единицы. Основной вклад в $\chi_{сум.}$ с учетом поправки на χ растворителя вносит растворенная CO_2. С увеличени-

ем C CO_2 от 50 до 5000 мкг/кг δ_2 уменьшается от 0,138 до 0,0102 при T = 323,15К и от 0,199 до 0,0154 при T = 373,15К. С увеличением T от 323,15 до 373,15К δ_2 возрастает в 1,44; 1,50 и 1,51раза при C CO_2, равной 50, 500 и 5000 мкг/кг. Величина δ_1 с ростом C CO_2 от 50 до 500 и 5000 мкг/кг уменьшается в 3,57 и в 11,9 раз при Т = 323,15К и в 10,9 раз при T = 373,15К. Величина δ_1 с ростом C CO_2 от 50 до 500 и 5000 мкг/кг уменьшается в 3,57 и в 11,9 раз при T = 323,15К и в 3,35; 10,9 раз при Т = 373,15К.

С ростом T от 323,15 до 373,15К δ_1 увеличивается в 1,38; 1,47 и в 1,50 раза при C CO_2, равной 50, 500 и 5000 мкг/кг. Так как $\delta_1 = \chi$ NaCl / $\chi_{сум.}$, то из табл. 1 следует, что присутствие_NaCl в конденсате пара при С CO_2 = 50 мкг/кг влияет на 12 % на $\chi_{сум.}$ при T = 323,15К и на 16,6% при T = 373,15К. Однако при увеличении C CO_2 до 500 и 5000 мкг/кг это влияние снижается до 3,36; 4,95 и 1,01 и 1,52 % соответственно.

Современные прецизионные приборы обеспечивают измерение проводимости разбавленных водных растворов электролитов с погрешностью не более 0,05–0,15 % [26]. При C CO_2, равной 50 и 500 мкг/кг, относительное увеличение $\chi_{сум}$ за счет NaCl, равное δ_1, составляет 0,12; 0,166 и 0,0336; 0,0495 (для T = 323,15 и 373,15К). При этом относительная погрешность определения $\chi_{сум}$ в таких измерениях будет не более 0,5% [6], что приемлемо для оценочных расчетов. При C CO_2, равной 5000 мкг/кг, δ_1 уменьшается до 0,0101 и 0,0152. В этом случае погрешность определения $\chi_{сум.}$, всего в два и в три раза меньше определяемой величины δ_2, и поэтому достоверная оценка δ_1 затруднена.

C CO_2 и С NaCl по данным о $\chi_{сум.}$ определяется по разработанной нами методике. Она основана на определении $\chi_{сум.}$ при T, равных 323,15 и 373,15К. При T = 323,15К

$$\chi_{сум.} = \chi_{сум.1} = \chi_1 CO_2 + \chi_1 NaCl,$$

где $\chi_1 CO_2$ и χ_1 NaCl — вклады в удельную электропроводность $\chi_{сум.}$, обусловленные присутствием в конденсате CO_2 и NaCl.

С изменением T изменятся $\chi_{сум.}$, $\chi_1 CO_2$ и χ_1 NaCl.

Пусть $\chi_1 CO_2$ при T = 373,15К изменится в a раз, а χ_1NaCl — в b раз. Тогда для T = 373,15К

$$\chi_{сум} = \chi_{сум.2} = a \cdot \chi_1 CO_2 + b \cdot \chi_1 NaCl.$$

Значения коэффициентов a и b находятся путем расчета χ по изложенной выше методике для монорастворов CO_2 и NaCl при T, равных 323,15 и 373,15К.

Решением системы двух представленных линейных уравнений для $\chi_{сум.1}$ и $\chi_{сум.2}$ находятся неизвестные $\chi_1 CO_2$ и χ_1 NaCl при T = 323,15К. Затем определяются значения С CO_2 и С NaCl при этой T на основании ранее полученных для водных монорастворов CO_2 и NaCl градуировочных зависимостей вида $\chi_1 = f(C)$. Результаты вычислительного эксперимента, выполненного в соответствии с предложенной методикой в рассматриваемом диапазоне изменения C и Т, подтвердили корректность предложенной математической модели.

Оценка погрешности аппроксимации данных о K_{d1} и Λ_o. Для выполнения расчетов с целью определения C CO_2 необходимы данные о K_{d1} и Λ_o угольной кислоты. На основании выполненных нами ранее экспериментальных исследований путем измерения электропроводности водных растворов CO_2 при T от 373,15 до 593,15К [6] были получены зависимости K_{d1} и Λ_o от Т. Нами предложены уравнения, описывающие эти зависимости [27]:

$$-lgK_{d1} = 2{,}49762 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0{,}013909088 \cdot T + 8{,}167523085;$$

$$\Lambda_o = 2{,}960 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 0{,}054 \cdot T^2 + 33{,}156 \cdot T - 5557{,}36.$$

Данные о $pK_{d1} = -lgK_{d1}$, Λ_o и значения относительной погрешности аппроксимации δ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимости первых кажущихся констант диссоциации K_{dI} и предельной эквивалентной электропроводности Λ_o угольной кислоты от температуры на линии насыщения и относительные погрешности их аппроксимации (δ pK_{dI} и δ Λ_o)

T, К	$pK_{d1} = -lg\ K_{d1}$, кмоль/м^3	δ pK_{d1}, %	$\Lambda_o \cdot 10$, См·м^2·кг-экв$^{-1}$	δ Λ_o, %
373,15	6,453	0,031	793	0,260
429,15	6,796	0,034	1000	0,934
473,15	7,186	0,110	1120	1,058
523,15	7,740	0,173	1160	0,306
573,15	8,346	0,647	1175	0,406
593,15	8,742	0,424	1184	0,317

Наименьшие значения δ для K_{d1} — при T не более 523,15К. В этом случае δ pK_{d1} не превышает 0,173 %. С увеличением T от 523,15 до 573,15К δ возрастает до 0,647 %. Наименьшее значение δ для Λ_o равно 0,26 % при T = 373,15К, наибольшее — 1,058 % при T = 473,15К.

Такую погрешность аппроксимации данных о K_{d1} и Λ_o можно считать приемлемой при выполнении расчетов с использованием указанных величин, учитывая значения погрешности полученных экспериментальных данных [6].

Следует отметить, что мы определяли C CO_2 и C NaCl на основании измерения $\chi_{сум.}$ при $T = 323{,}15$ и $T = 373{,}15$К. Аналогичные измерения можно выполнять и при более высоких T. При этом с уменьшением K_{d1} уменьшается χ растворов CO_2 и изменятся значения δ_1 и δ_2, представленные в табл. 1. Такая работа может быть выполнена в рамках отдельного исследования.

Заключение. Разработан метод оперативного кондуктометрического контроля концентраций CO_2 и NaCl в конденсате пара на ТЭС при нейтральном ВХР без дозирования аммиака. Предложено устройство для его реализации, обеспечивающее дифференцирование примесей и значительное снижение инерционности контроля. Выполнена оценка погрешности определения концентраций предложенным методом. Рассчитана погрешность аппроксимации для зависимостей, описывающих поведение первых кажущихся констант диссоциации и предельной эквивалентной электропроводности угольной кислоты при T от 373,15 до 593,15К, которые можно использовать при расчете концентраций предложенным методом, а также при организации и ведении ВХР.

Информация о концентрации примесей для одних и тех же объектов, полученная одновременно от устройств контроля, реализующих предложенный метод, и от устройств, работающих с охлажденной пробой [4, 5], может быть использована для создания нового контроля, сочетающего в себе преимущества обоих методов и расширяющего возможности совершенствования существующих систем химико-технологического мониторинга ВХР на ТЭС и АЭС [28].

Библиографический список

1. Воронов, В. Н. Водно-химические режимы ТЭС и АЭС / В. Н. Воронов, Т. И. Петрова. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. — 238 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ СО 153-34.20.501-2003 / Министерство энергетики Российской Федерации. — Москва : Энергосервис, 2003. — 145 с.
3. Ларин, Б. М. Основы математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС и АЭС / Б. М. Ларин, Е. Н. Бушуев. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. — 306 с.
4. Мартынова, О. И. Поведение органики и растворенной углекислоты в пароводяном тракте электростанций / О. И. Мартынова // Теплоэнергетика. — 2002. — № 7. — С. 67–70.
5. Бушуев, Е. Н. Исследование и математическое моделирование химико-технологических процессов водообработки на ТЭС : дис. … д-ра техн. наук / Е. Н. Бушуев. — Иваново, 2010. — 359 с.
6. Щербаков, В. Н. Исследование электрофизических свойств водных теплоносителей при высоких параметрах : дис. … канд. техн. наук / В. Н. Щербаков. — Москва, 1980. — 204 с.
7. Кондуктометрический датчик : а. с. 958943 СССР : МКИ^4 G01N 27/02 / Д. Л. Тимрот [и др.]. — № 3248961 ; заявл. 16.02.81 ; опубл. 15.09.82, Бюл. № 34. — 3 с.
8. Щербаков, В. Н. Совершенствование кондуктометрического контроля качества конденсата пара при термической очистке вод / В. Н. Щербаков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 13, № 3/4 (72/73). — С. 117–124.
9. Экспериментальное и теоретическое обоснование нового метода контроля качества рабочего тела в контурах ТЭС и АЭС / Н. Н. Ефимов [и др.] // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2012. — № 3 (166). — С. 28–32.
10. Лукашов, Ю. М. Экспериментально-теоретическое обоснование новых методов контроля качества пара и воды современных теплоэнергетических установок : дис. … д-ра техн. наук / Ю. М. Лукашов. — Москва, 1981. — 412 с.
11. Новый справочник химика и технолога : в 12 т. Т. 7. Химическое равновесие. Свойства растворов / под ред. А. М. Симановой. — Санкт-Петербург : Профессионал, 2004. — 998 с.
12. Дамаскин, Б. Б. Электрохимия / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. — Москва : Химия ; Колос С, 2006. — 672 с.
13. Добош, Д. Электрохимические константы. Справочник для электрохимиков / Д. Добош. — Москва : Мир, 1980. — 365 с.
14. Stefansson, A. Carbonic acid ionization and the stability of sodium bicarbonate and carbonate ion pairs to 200°C — A potentiometric and spectrophotometric study / A. Stefansson, P. Benezeth, J. Schott // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 2013. — Vol. 120. — P. 600–611.
15. Рыженко, Б. Н. Определение констант диссоциации угольной кислоты и расчет степеней гидролиза CO_3^{2-}- и HCO_3-ионов в растворах карбонатов и бикарбонатов при повышенных температурах / Б. Н. Рыженко // Геохимия. — 1963. — № 2. — С. 137–148.
16. Read, A.-J. The First Ionization Constant of Carbonic Acid from 25 to 250° C and to 2000 bar / A.-J. Read // Journal of Solution Chemistry. — 1975. — Vol. 4, № 1. — P. 53–70.

17. Dickson, A.-G. A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media / A. G. Dickson, F. J. Millero // Deep-Sea Research. — 1987. — Vol. 34. — P. 1733–1743.

18. Shedlovsky, T. The first ionization constant of carbonic acid, 0 to 38 from conductance measurements / T. Shedlovsky, D.-A. MacInnes // Journal of the American Chemical Society. — 1935. — Vol. 57. — P. 1705–1710.

19. Harned, H.-S. The first ionization of carbonic acid in aqueous solution of sodium chloride / H.-S. Harned, F.-T. Bonner // Journal of the American Chemical Society. — 1945. — Vol. 67. — P. 1026–1031.

20. Nakayama, F.-S. Thermodynamic functions for the dissociation of $NaHCO_3$, $NaCO_3$-, H_2CO_3, and HCO_3- / F.-S. Nakayama // Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. — 1971. — Vol. 33. — P. 1287–1291.

21. Spectrophotometric measurement of the first dissociation constants of carbonic acid at elevated temperatures / S.-N. Park [et al.] // Journal of the Chemical Society Faraday Transactions. — 1998. — Vol. 94. — P. 1421–1425.

22. The dissociation of carbonic acid in NaCl solutions as a function of concentration and temperature / F.-J. Millero [et al.] // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 2007. — Vol. 71. — P. 46–55.

23. Carbonate equilibrium in hydrothermal systems — first ionization of carbonic acid in NaCl media to 300^o C / C.S. Patterson [et al.] // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1982. — Vol. 46. — P. 1653–1663.

24. Li, D. The speciation equilibrium coupling with phase equilibriumin the H_2O–CO_2–NaCl system from 0 to 250^o C, from 0 to 1000 bar, and from 0 to 5 molality of NaCl / D. Li, Z. Duan // Chemical Geology. — 2007. — Vol. 244. — P. 730–751.

25. Робинсон, Р. Растворы электролитов / Р. Робинсон, Р. Стокс. — Москва : Иностранная литература, 1963. — 425 с.

26. Первухин, Б. С. Развитие научно-методических основ проектирования кондуктометрических приборов контроля жидкостей и разработка технических средств их метрологического обеспечения : автореф. дис. … д-ра техн. наук / Б. С. Первухин. — Барнаул, 2012. — 39 с.

27. Щербаков, В. Н. Инновационные электрофизические методы оперативного контроля качества вод типа конденсата на ТЭС / В. Н. Щербаков, Г. А. Власков // Обозрение прикладной и промышленной математики. — 2014. — Т. 21, вып. 5. — С. 764–765.

28. Егошина, О. В. Современное состояние систем химико-технологиче-ского мониторинга на тепловых станциях на основе опыта МЭИ и НПЦ «Элемент» / О. В. Егошина, В. Н. Воронов, М. П. Назаренко // Теплоэнергетика. — 2014. — № 3. — С. 39–45.

References

1. Voronov, V.N., Petrova, T.I. Vodno-khimicheskie rezhimy TES i AES. [Water chemistry of TPP and NPP.] Mos cow: Izdatel'skiy dom MEI, 2009, 238 p. (in Russian).

2. Ministry of Energy of the Russian Federation. Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stantsiy i setey RF SO 153-34.20.501-2003. [Operational regulation of power plants and networks of the Russian Federation CO 153-34.20.501-2003.] Moscow: Energoservis, 2003, 145 p. (in Russian).

3. Larin, B.M., Bushuyev, E.N. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov obrabotki teplonositelya na TES i AES. [Fundamentals of mathematical modeling of chemical-technological coolant treatment at TPP and NPP.] Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2009, 306 p. (in Russian).

4. Martynova, O.I. Povedenie organiki i rastvorennoy uglekisloty v parovodyanom trakte elektrostantsiy. [The Behavior of Organic Compounds and Dissolved Carbon Dioxide in the Steam-Water Path of Power Stations.] Thermal Engineering, 2002, no. 7, pp. 67–70 (in Russian).

5. Bushuyev, E.N. Issledovanie i matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov vodoobrabotki na TES: dis. … d-ra tekhn. nauk. [Investigation and mathematical modeling of chemical-technological processes of water treatment at TPP: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Ivanovo, 2010, 359 p. (in Russian).

6. Shcherbakov, V.N. Issledovanie elektrofizicheskikh svoystv vodnykh teplonositeley pri vysokikh parametrakh: dis. … kand. tekhn. nauk.[Study on electrophysical properties of water coolants at high settings: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Moscow, 1980, 204 p. (in Russian).

7. Timrot, D.L., et al. Konduktometricheskiy datchik: a. s. 958943 SSSR : MKI4 G01N 27/02. [Conductivity sensor.] Inventor’s Certificate no. 958943 USSR $МКИ^4$ G01N 27/02, 1982 (in Russian).

8. Shcherbakov, V.N. Sovershenstvovanie konduktometricheskogo kontrolya kachestva kondensata para pri termicheskoy ochistke vod. [Improving conductometric quality control of steam condensate under thermal water treatment.] Vestnik of DSTU, 2013, vol. 13, no. 3/4 (72/73), pp. 117–124 (in Russian).

9. Efimov, N.N., et al. Eksperimental'noe i teoreticheskoe obosnovanie novogo metoda kontrolya kachestva rabochego tela v konturakh TES i AES.[Experimental and Theoretical Study of a New Method for Monitoring the Quality of the Working Fluid in the Contours of Thermal and Nuclear Power Plants.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Technical Sciences.2012, no. 3 (166), pp. 28–32 (in Russian).

10. Lukashov, Y. M. Eksperimental'no-teoreticheskoe obosnovanie novykh metodov kontrolya kachestva para i vody sovremennykh teploenergeticheskikh ustanovok : dis. … d-ra tekhn. nauk. [Experimental and theoretical justification of new methods of water and vapor quality control of modern thermal power plants: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Moscow, 1981. — 412 c. (in Russian).

11. Simanova, A.M., ed. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa : v 12 t. T. 7. Khimicheskoe ravnovesie. Svoystva rastvorov. [New reference guide for a chemist and technologist: in 12 vol. Vol. 7. Chemical equilibrium. Properties of solutions.] St. Petersburg: Professional, 2004, 998 p. (in Russian).

12. Damaskin, B.B., Petriy, O.A., Tsirlina, G.A. Elektrokhimiya. [Electrochemistry.] Moscow: Khimiya; Kolos S, 2006, 672 p. (in Russian).

13. Dobosh, D. Elektrokhimicheskie konstanty. Spravochnik dlya elektrokhimikov. [Electrochemical constants. Reference guide for electrochemists.] Moscow: Mir, 1980, 365 p. (in Russian).

14. Stefansson, A., Benezeth, P., Schott, J. Carbonic acid ionization and the stability of sodium bicarbonate and carbonate ion pairs to 200°C — A potentiometric and spectrophotometric study. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, vol. 120, pp. 600–611.

15. Ryzhenko, B.N. Opredelenie konstant dissotsiatsii ugol'noy kisloty i raschet stepeney gidroliza SO32- i NSO3- ionov v rastvorakh karbonatov i bikarbonatov pri povyshennykh temperaturakh. [Determination of dissociation constants of carbonic acid, and calculation of hydrolysis degrees of CO_3^{2}- and HCO_3- ions in carbonate and bicarbonate solutions at high temperatures.] Geochemistry, 1963, no. 2, pp. 137–148 (in Russian).

16. Read, A.-J. The First Ionization Constant of Carbonic Acid from 25 to 250° C and to 2000 bar. Journal of Solution Chemistry, 1975, vol. 4, no. 1, pp. 53–70.

17. Dickson, A.G., Millero, F.J. A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media. Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1987, vol. 34, iss. 10, pp. 1733–1743.

18. Shedlovsky, T., MacInnes, D.-A. The first ionization constant of carbonic acid, 0 to 38 from conductance measurements. Journal of the American Chemical Society, 1935, vol. 57, pp. 1705–1710.

19. Harned, H.-S., Bonner, F.-T. The first ionization of carbonic acid in aqueous solution of sodium chloride. Journal of the American Chemical Society, 1945, vol. 67, pp. 1026–1031.

20. Nakayama, F.-S. Thermodynamic functions for the dissociation of $NaHCO_3^0$, $NaCO_3^-$, H_2CO_3 and HCO_3^- Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 1971, vol. 33, pp. 1287–1291.

21. Park, S.-N., et al. Spectrophotometric measurement of the first dissociation constants of carbonic acid at elevated temperatures. Journal of the Chemical Society Faraday Transactions, 1998, vol. 94, iss. 10, pp. 1421–1425.

22. Millero, F., et al. The dissociation of carbonic acid in NaCl solutions as a function of concentration and temperature. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, vol. 71, iss. 1, pp. 46–55.

23. Patterson, C.S., et al. Carbonate equilibrium in hydrothermal systems — first ionization of carbonic acid in NaCl media to 300° C. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, vol. 46, iss. 9, pp. 1653–1663.

24. Li, D., Duan, Z. The speciation equilibrium coupling with phase equilibriumin the H_2O–CO_2–NaCl system from 0 to 250° C, from 0 to 1000 bar, and from 0 to 5 molality of NaCl . Chemical Geology, 2007, vol. 244, iss. 3-4, pp. 730–751.

25. Robinson, R., Stoks, R. Rastvory elektrolitov. [Electrolyte solutions.] Moscow: Inostrannaya literatura, 1963, 425 p. (in Russian).

26. Pervukhin, B.S. Razvitie nauchno-metodicheskikh osnov proektirovaniya konduktometricheskikh priborov kontrolya zhidkostey i razrabotka tekhnicheskikh sredstv ikh metrologicheskogo obespecheniya: avtoref. dis. … d-ra tekhn. nauk. [Development of scientific and methodological foundations of conductometric fluid control devices design and techniques engineering of their metrological assurance: Dr.Sci. (Eng.) diss., author's abstract.] Barnaul, 2012, 39 p. (in Russian).

27. Shcherbakov, V.N., Vlaskov, G.A. Innovatsionnye elektrofizicheskie metody operativnogo kontrolya kachestva vod tipa kondensata na TES. [Innovative electrophysical methods of operational monitoring of condensate-type water quality at TPP.] Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki, 2014, vol. 21, iss. 5, pp. 764–765 (in Russian).

28. Egoshina, O.V.. Voronov, V.N., Nazarenko, M.P. Sovremennoe sostoyanie sistem khimiko-tekhnologiche-skogo monitoringa na teplovykh stantsiyakh na osnove opyta MEI i NPTs «Element». [Modern State of Cycle Chemistry Monitoring Systems at Thermal Power Stations According to the Experience Gained at the Moscow Power Engineering Institute and Element Research and Production Center.] Thermal Engineering, 2014, no. 3, pp. 39–45 (in Russian).

Поступила в редакцию 10.09.2015
Сдана в редакцию 10.09.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791 DOI 10.12737/16071

Имитационное моделирование многоочагового разрушения с учетом неоднородного распределения номинальных напряжений*

В. Ф. Лукьянов[1], С. С. Ассауленко[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Simulation of multicentric destruction with regard for inhomogeneous distribution of rated voltage***

V. F. Lukyanov[1], S. S. Assaulenko[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Разработан алгоритм, имитирующий процесс зарождения и развития усталостных трещин в сварном соединении на примере узла крепления мобильной платформы и опорной обечайки поворотного устройства грузоподъемного крана Gottwald НМК 170 EG (63 т), разрушение которого произошло в 2011 году на территории ОАО «Новороссийский морской торговый порт» (НМТП). Предложенный алгоритм учитывает неоднородную геометрию шва, влияющую на значение коэффициента концентрации напряжений, и неравномерное распределение номинальных напряжений, связанное с конструктивными особенностями узла. В основе процесса моделирования лежит экспериментально установленный факт, что профиль геометрии перехода от шва к основному металлу вдоль сварного соединения изменяется случайно. В результате этого появление трещин вдоль шва носит случайный характер. При циклическом нагружении развитие разрушения представляет собой последовательный процесс зарождения трещин на различных участках сварного соединения вдоль шва, подрастание одиночных поверхностных трещин по законам механики разрушения, появление новых трещин, слияние трещин на соседних участках. При слиянии берегов трещины изменяется профиль контура, что приводит к увеличению скорости роста глубины трещины. В дальнейшем процесс развития многоочагового разрушения продолжается до достижения трещиной критического размера. Скорость накопления повреждений и развития разрушения зависит от степени неоднородности концентрации напряжений вдоль шва. Реализация предложенной модели позволит решить задачи определения периодичности диагностирования узла, мест с наибольшей вероятностью возникновения усталостных трещин и обосновать возможные методики усиления конструкции.

Ключевые слова: многоочаговое разрушение, концентрация напряжений, распределение НДС, неравномерное распределение номинальных напряжений.

The algorithm simulating the initiation and development of fatigue cracks in the joint weld on the example of the mount of the mobile platform and the supporting cowl of Gottwald NMK 170 EG (63 tons) crane rotator, the destruction of which occurred in 2011 in the territory of "Novorossiysk commercial sea port" OJSC (NCSP), is worked out. The proposed algorithm takes into account the non-uniform weld geometry affecting the value of the stress concentration factor and the uneven distribution of the rated stress related to the joint design features. The modeling process is based on the experimentally established fact that the geometry profile of the junction between the weld and the base metal along the welded joint changes randomly. As a result, the fatigue flaking along the weld lacks any regular pattern. Under the cyclic loading, the development of the destruction is a sequential process of the crack nucleation in different parts of welded joints along the weld, single surface cracks growth under the fracture mechanics laws, nucleation of new cracks, and crack coalescence in the adjoining sections. At the coalescence of the crack edges, the contour profile is changing which leads to increasing the growth rate of the crack depth. In the future, the development of the multicentric destruction continues until the critical crack. The damage accumulation and destruction development rate depends on the uniformity coefficient of the stress concentration along the weld. The implementation of the proposed model allows solving the problems of determining the frequency of node diagnosis and the points with the utmost probability of fatigue cracks initiation, as well as validating the possible methods of structural reinforcement.

Keywords: multifocal destruction, stress concentration, distribution of stress strain behavior, uneven distribution of rated stress.

Введение. Для прогнозирования процесса разрушения сварных конструкций при циклическом нагружении зачастую используют аналитические модели, которые позволяют оценивать долговечность и надежность относительно простых

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: vfl1@bk.ru , assaulenko_s@mail.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

тел с трещинами. Однако они не всегда позволяют учитывать многообразие факторов, влияющих на процесс разрушения сварных соединений, и вынуждают прибегать к упрощению реальных явлений. Этот факт указывает на то, что использование аналитических моделей для расчета характеристик прочности сварных соединений может быть слишком неточным.

Имитационное моделирование позволяет учитывать большое количество особенностей процесса развития разрушений сварных соединений, особенно в крупногабаритных конструкциях, которые могут иметь несколько зон концентрации напряжений.

Процесс статистического моделирования зарождения и развития разрушений в сварных конструкциях подробно описан в работах сотрудников кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ [1–3]. Однако в этих работах моделирование рассматривалось с позиции неизменного распределения номинальных напряжений вдоль шва.

Целью работы является обоснование возможности использования процесса имитационного моделирования с учетом неоднородного распределения номинальных напряжений в конструкции.

Как показали результаты многочисленных экспериментов [1–3], зона разрушения конструкций с протяженными угловыми швами связана с концентрацией напряжений в месте перехода от шва к основному металлу. При этом кинетика развития разрушения существенно зависит от неоднородности геометрии профиля шва вдоль протяженных сварных соединений. Для сварных соединений с однородной геометрией профиля шва вдоль соединения разрушение происходит в виде появления одиночных, далеко расположенных друг от друга трещин и их роста в соответствии с законами механики разрушения для одиночных поверхностных трещин. В этом случае долговечность конструкции с учетом стадии развития трещины можно рассчитать по следующей формуле:

$$N = N_з + N_р, \quad (1)$$

где $N_з$ — длительность периода зарождения трещины; $N_р$ — длительность периода роста одиночной трещины [4].

С увеличением степени неоднородности геометрии профиля шва вдоль сварного соединения количество центров зарождения трещин возрастает. Фронты отдельных трещин могут соприкасаться, что приводит к слиянию трещин в процессе их роста при циклическом нагружении. Такое разрушение получило название «многоочаговое».

В отличие от случая одиночных или редко расположенных трещин, кинетика процесса многоочагового развития представляет собой параллельное развитие трех процессов [3]:

– зарождение одиночных трещин на различных участках сварного соединения;
– рост одиночных трещин до соприкосновения берегов трещины с трещиной на соседнем участке;
– слияние соседних трещин с образованием единого фронта трещины большей протяженности.

При дальнейшем циклическом нагружении процесс роста существующих трещин, образования новых трещин и их слияние продолжается до достижения одной из трещин критического значения.

Для случая многоочагового развития разрушения использовать формулу 1 не представляется возможным, т. к. при слиянии берегов соседних трещин форма контура объединенной трещины существенно изменяется и для моделирования кинетики такого развития разрушения необходимо разрабатывать имитационные модели.

В работе [5] доказано, что расположение участков сварного соединения, на которых зарождаются трещины, должно носить случайный характер, поскольку зарождение трещин зависит от амплитуды локальных деформаций.

В соответствии с уравнением Басквина-Мэнсона-Коффина [6–8] длительность периода зарождения разрушения при циклическом нагружении определяется амплитудой деформаций в локальной зоне сварного соединения. Величина локальной амплитуды деформаций зависит от уровня номинальных напряжений и коэффициента концентрации напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу.

Номинальные напряжения в зоне расположения сварного шва зависят от конструкции рамы платформы, опорно-поворотного узла и нагрузки на стрелу крана. В процессе поворота стрелы крана уровень номинальных напряжений в зоне сварного соединения изменяется, что создает неравномерное распределение их вдоль шва.

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) металла платформы в зоне сварного соединения при различных углах поворота стрелы использовался метод конечных элементов (программный продукт ANSYS).

Результаты расчета представлены на рис. 1, где пунктирной линией показано распределение номинальных напряжений вдоль сварного соединения при расположении стрелы вдоль оси I–I; штрихпунктирной линией — при расположении стрелы вдоль оси II–II; сплошной линией — при расположении стрелы вдоль оси III–III. Независимо от угла поворота стрелы номинальные напряжения достигают максимальных значений в одних и тех же точках (зона 1; зона 2; зона 3).

Анализ конструкции рамы показывает, что эти зоны соответствуют местам расположения ребер жесткости рамы, которые изменяют локальную жесткость конструкции [9].

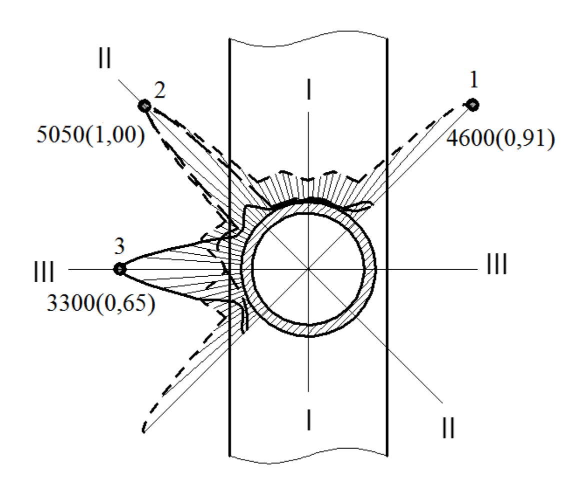


Рис. 1. Эпюра номинальных напряжений вдоль сварного шва, соединяющего раму платформы и обечайку опорного кольца

Таким образом, в отличие от известных ранее моделей [3], в данном случае при разработке имитационной модели необходимо учитывать неравномерный характер распределения номинальных напряжений вдоль шва. Кроме того, проведенный конечно-элементный анализ показывает, что путем изменения конструкции рамы можно существенно влиять на ресурс работы сварного соединения [10].

Следующим фактором, определяющим амплитуду деформаций при циклическом нагружении сварного соединения, является коэффициент концентрации напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу.

Основные параметры, оказывающие влияние на коэффициент концентрации напряжений тавровых сварных соединений, проиллюстрированы на рис. 2.

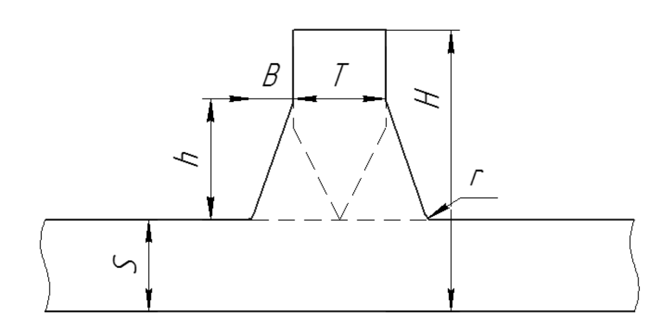


Рис. 2. Геометрические параметры таврового соединения

В работе А. В. Ильина, Г. П. Карзова и В. П. Леонова [11] для определения коэффициента концентрации напряжений тавровых сварных соединений использовалось полученное авторами опытным путем соотношение:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 0{,}25\sqrt{\frac{s}{r}} * \sqrt[4]{\frac{T+2b}{s}}\left[1 - exp\left(-1{,}9\sqrt{\frac{h}{b}}\right)\right]. \quad (2)$$

Наибольшее влияние на коэффициент концентрации напряжений α_{σ} оказывает соотношение *r/s*. Так как s является постоянной величиной, то для определения α_{σ} главным фактором является определение радиуса перехода *r*. Он не регламентируется нормативными документами и может варьироваться от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров. Радиус перехода представляет собой случайную величину [2], может изменяться в достаточно широких пределах вдоль сварного соединения. Этот факт является причиной существенной нестабильности по длине шва значений концентрации напряжений, что необходимо учитывать при моделировании кинетики разрушения сварных соединений, работающих при переменных нагрузках.

Для осуществления моделирования кинетики развития разрушения разработан алгоритм имитационного моделирования, который включает два этапа.

На этапе I моделируется случайный процесс многоочагового зарождения трещин. С этой целью:

1. Сварной шов разбивают на отдельные участки l_i с одинаковыми значениями коэффициентов концентрации напряжений в пределах каждого участка в соответствии со статистическими характеристиками распределения значений длин участков. Положение участков вдоль сварного соединения X_i определяют с помощью датчика случайных чисел.

2. Для каждого участка в соответствии с кривой распределения номинальных напряжений (например, рис. 1) задают уровень номинальных напряжений σ_i (детерминированная величина).

3. Используя полученную экспериментально функцию распределения радиусов, с помощью датчика случайных чисел для каждого i–того участка устанавливают значение радиуса r_i.

4. Подставляя в выражение (2) значение радиуса, для каждого i–того участка производят расчет значений теоретического (без учета развития пластических деформаций) коэффициента концентрации напряжений α_σ с учетом других необходимых параметров геометрии профиля сечения сварного соединения, которые можно принять неизменными вдоль всего шва (толщина стенки, размер катета и др.).

5. Расчеты показывают, что на каждом участке поле главных напряжений имеет явно выраженный вектор, направленный перпендикулярно линии шва. Вторые два компонента имеют значительно меньшую величину по сравнению с первым, поэтому для упрощения в расчете напряженное состояние рассматривали как одноосное. Принимая во внимание, что металл в вершине концентратора находится в упругом состоянии, расчет коэффициента концентрации деформаций проводили как для одноосного растяжения с использованием закона Гука. Для каждого участка определяют амплитуду локальных деформаций на основе принятых значений номинальных напряжений (шаг 2) и значений коэффициента концентрации (шаг 4). Т. к. локальные напряжения могут превышать предел текучести, то для расчета амплитуды деформаций используется уравнение Нейбера

$$\alpha_\sigma^2 = \alpha_{\alpha p}^2 + \alpha_\varepsilon^2, \tag{3}$$

где α_σ — коэффициент концентрации напряжений в упругой области; $\alpha_{\sigma p}$ — коэффициент концентрации напряжений упруго-пластической области; α_ε — коэффициент концентрации деформаций. Уравнение (3) позволяет определить амплитуду локальных деформаций ε_α, необходимую для расчета длительности периода зарождения трещины.

6. Для каждого i–того участка рассчитывают число циклов до появления трещины в зависимости от амплитуды деформаций на i–том участке. Для расчета используется модифицированное уравнение Басквина-Мэнсона-Коффина [6–8]:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{1}{(4N)^{m_p} + \dfrac{1+r^*}{1-r^*}} \ln\frac{100}{100-\psi^t} + \frac{\sigma_{-1}^t / E^t}{1 + \dfrac{\sigma_{-1}^t(1+r)}{\sigma_B^t(1-r)}}, \tag{4}$$

где E^t — модуль упругости; ψ^t — относительное сужение; σ_{-1}^t — предел выносливости на базе 10^6; σ_B^t — предел прочности; m_p — характеристика металла. Параметры E^t, ψ^t, ; σ_B^t принимаются в соответствии со стандартом или техническими условиями для конкретной стали. Значение показателя степени m_p для малоуглеродистых низколегированных сталей с пределом прочности σ_B^t = 300–700 МПа принимается равным 0,5.

Расчеты, выполненные на этапе I имитационного моделирования, позволяют создать базу $Б_j$ чисел циклов N_i до зарождения трещин на каждом i–том участке вдоль сварного соединения. В качестве критерия зарождения разрушения принято появление полуэллиптической трещины длиной, равной длине участка l_j, глубиной b_i = 0,5мм.

На этапе II модель имитирует процесс развития многоочагового разрушения на основе уравнения Пэриса [12]:

$$V = \frac{dL}{dN} = C(\Delta K_I)^m, \tag{5}$$

где V — скорость изменения глубины и длины полуэллиптической трещины в процессе дальнейшего циклического нагружения конструкции; ΔK_I — размах коэффициента интенсивности напряжений; C и m — постоянные, соответствующие выбранному материалу.

В отличие от роста одиночных трещин в данном случае слияние соседних трещин увеличивает длину фронта трещины на поверхности, что приводит к увеличению размаха коэффициента интенсивности напряжений и скорости роста трещины.

С учетом случайного процесса накопления трещин вдоль сварного соединения, их подрастания и слияния фронтов соседних трещин, процесс имитационного моделирования развития разрушения включал в себя следующую последовательность действий:

1. На основе базы данных числа циклов $Б_j$ до появления трещин определяется участок, на котором появились трещины при минимальном значении числа циклов N_i, и длина этого участка L_i. Принимая для этого участка исходные размеры полуэллиптической трещины $L_i = l_j$ и b_i=0,5мм, производится расчет размаха коэффициента интенсивности напряжений.

2. Значение числа циклов нагружения увеличивается на заданный шаг ΔN и на основании уравнения Пэриса (5) рассчитываются новые размеры трещин, имевшихся на предыдущем шаге.

3. Далее, используя базу $Б_j$, определяют на каких участках сварного соединения должны появиться новые трещины и анализируют взаимное расположение новых трещин и существовавших на предыдущем шаге.

Если фронты новых трещин не соприкасаются с существующими, то им назначают исходные размеры $L_i = l_j$ и b_i = 0,5мм.

Если фронты новых трещин соприкасаются с существующими фронтами, то осуществляют их слияние, при этом их длину на поверхности принимают равной сумме объединенной трещины, а в качестве глубины принимают наибольшую глубину из объединенных трещин. После этого производится сортировка базы $Б_j$, с присвоением новых номеров участков сварного соединения и размеров существующих на этом шаге трещин. Таким образом, получают откорректированную базу $Б_j^n$, где n>1 — номер шага моделирования многоочагового развития разрушения.

4. Используя базу $Б_j^n$, увеличивают номер шага n+1 и повторяют операции, предусмотренные в пунктах 2–4 до тех пор, пока какая либо из трещин достигнет величины предельного размера.

Предельный размер трещины устанавливают исходя из следующих соображений. Трещина предельного размера не должна нарушать эксплуатацию конструкции в штатном режиме, а визуальный контроль должен позволять выявить трещины при диагностике крупногабаритных конструкций. При обследовании парка мобильных кранов в новороссийском порту выяснилось, что минимальный размер обнаруживаемых при визуальном контроле трещин составляет 130 мм на поверхности.

5. В связи с тем, что изменение геометрических параметров шва носит случайный характер, для получения статистически значимых результатов модель рассматривают многократно с измененным состоянием датчика случайных чисел.

6. Расчет заканчивают статистической обработкой результатов моделирования с целью определения наиболее вероятного места появления трещин предельного размера и числа циклов нагружения.

Выводы. Имитационное моделирование многоочагового разрушения позволяет:

1. Прогнозировать периодичность проведения диагностики состояния конструкций;
2. Упростить выявление мест повреждения;
3. Обосновать технологические и конструктивные варианты ремонта и усиления рамной конструкции;
4. Принимать решение о необходимости внесения конструктивных изменений для перераспределения силовых потоков в узле в случае обнаружения участков с локальным повышением концентрации напряжений.

Библиографический список

1. Лукьянов, В. Ф. Статистическое моделирование разрушения сварных соединений / В. Ф. Лукьянов, А. С. Коробцов, В. В. Напрасников // Автоматическая сварка. — 1989. — № 1. — С. 43–48.

2. Lukjanov, V. F. Imitative simulation of welded joint fracture under low-cycle loading / V. F. Lukjanov, A. S. Korobtsov // International Journal of Pressure vessels and Piping. — 1991. — vol. 47, iss. 2 — С. 193–206.

3. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций / С. А. Куркин, В. М. Ховов [и др.]; под ред. С. А. Куркина, В. М. Ховова. — Москва : изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 464 с.

4. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках. ГОСТ 25859-83 / Государственный комитет стандартов Совета министров СССР. — Москва : Издательство стандартов, 1983. — 36 с.

5. Пархоменко, А. А. Методы и критерии оценки локального напряженно-дерформированного состояния сварных соединений : дисс. магистра техники и технологии / А. А. Пархоменко. — Ростов-на-Дону, 2006. — 111 с.

6. Basquin, O. H. The exponential law of endurance tests // Proc. ASTM. — 1910. — № 10. — P. 625–630.

7. Manson, S. S. Fatigue : a complex subject-some simple approximation // Exp. Mech. — 1965. — № 5. — P. 193–226.

8. Coffin, L. F. A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metal // Trans. ASME. — 1954. — № 76. — P. 931–950.

9. Лукьянов, В. Ф. Анализ причин разрушения металлических конструкций опорного узла стрелового крана / В. Ф. Лукьянов, С. С. Ассауленко // Вестник Дон . гос. техн. ун-та. — 2014. — № 4 (79). — С. 186–194.

10. Ассауленко, С. С. Оптимизация размещения ребер жесткости при ремонте рамы поворотной платформы грузоподъемного крана // Вектор науки ТГУ. — 2014. — № 1 (27). — С. 33–35.

11. Методы расчета циклической прочности сварных соединений / А.В. Ильин [и др.] — Ленинград : ЛДНТП, 1983. — 33 с.

12. Paris, P. C. A critical analysis of crack propagation laws / P. C. Paris, F. A. Erdogan // Trans ASME. J. Bas. Eng. — 1963. — № 4. — P. 528–534

References

1. Lukjanov, V.F., Korobtsov, A.S, Naprasnikov, V.V. Statisticheskoe modelirovanie razrusheniya svarnykh soedineniy. [Statistical modeling of fracture of welded joints.] Automatic Welding, 1989, no. 1, pp. 43–48 (in Russian).

2. Lukjanov, V. F., Korobtsov, A.S. Imitative simulation of welded joint fracture under low-cycle loading. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1991, vol. 47, iss. 2, pp. 193-206.

3. Kurkin, S.A., Khovov, V.M., eds., et al. Komp'yuternoe proektirovanie i podgotovka proizvodstva svarnykh konstruktsiy. [Computer-aided design and preproduction of welded structures.] Moscow: Izd-vo MVTU im. N.E. Baumana, 2002, 464 p. (in Russian).

4. Sosudy i apparaty stal'nye. Normy i metody rascheta na prochnost' pri malotsiklovykh nagruzkakh. GOST 25859-83. [State standard 25859-83. Steel vessels and apparatuses. Norms and methods of fatigue strength calculation under low-cyclic loads.] Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1983, 36 p. (in Russian).

5. Parkhomenko, A.A. Metody i kriterii otsenki lokal'nogo napryazhenno-derformirovannogo sostoyaniya svarnykh soedineniy : diss. magistra tekhniki i tekhnologii. [Methods and criteria for evaluating the local stress-strain state of welded joints: Master of Engineering and Technology diss.] Rostov-on-Don, 2006, 111 p. (in Russian).

6. Basquin, O. H. The exponential law of endurance tests. Proceedings, American Society for Testing and Materials, 1910, vol. 10, pp. 625–630.

7. Manson, S.S. Fatigue: a complex subject-some simple approximation. Experimental Mechanics, 1965, vol. 5, iss. 4, pp. 193–226.

8. Coffin, L.F., Jr. A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Transactions of the ASME, 1954, vol. 76, pp. 931–950.

9. Assaulenko, S.S., Lukyanov, V.F. Analiz prichin razrusheniya metallicheskikh konstruktsiy opornogo uzla strelovogo krana. [Failure analysis of boom seat metal structures.] Vestnik of DSTU, 2014, no. 4(79), pp. 186–194 (in Russian).

10. Assaulenko, S.S. Optimizatsiya razmeshcheniya reber zhestkosti pri remonte ramy povorotnoy platformy gruzopod"emnogo krana. [Optimize the placement of stiffening ribs for repair of a lifting crane platform.] Vektor nauki TGU, 2014, no. 1 (27), pp. 33–35 (in Russian).

11. Iluin, A.V., et al. Metody rascheta tsiklicheskoy prochnosti svarnykh soedineniy. [Analysis techniques for fatigue strength of welded joints.] Leningrad: LDNTP, 1983, 33 p. (in Russian).

12. Paris, P.C., Erdogan, F.A. A critical analysis of crack propagation laws. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering, 1963, no. 4, pp. 528–534.

Поступила в редакцию 01.06.2015
Сдана в редакцию 01.06.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 53.08 DOI 10.12737/16066

Исследование механических и микрогеометрических характеристик покрытия TiN на подложке из стали 40Х, нанесенного методом ионно-плазменного напыления*

Е. В. Садырин[1], Б. И. Митрин[2], Л. И. Кренев[3], С. М. Айзикович[4]**
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study on mechanical and microgeometric characteristics of ion-plasma deposited TiN coating on 40Cr steel substrate ***

E. V. Sadyrin[1], B. I. Mitrin[2], L. I. Krenev[3], S. M. Aizikovich[4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Проведено исследование покрытия из нитрида титана (TiN), нанесенного методом ионно-плазменного напыления на подготовленную поверхность образца стали 40Х. Для измерения толщины покрытия часть поверхности закрывалась маской из медной фольги. Свойства и характерные особенности микрорельефа поверхности образца до и после нанесения покрытия исследовались с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Описана и применена методика определения толщины покрытия с высокой точностью на основе результатов АСМ сканирования переходной между подложкой и покрытием зоны на поверхности образца. Вычисленная неопределенность измеренного значения толщины значительно меньше, чем при использовании других методов. Методом инструментального индентирования измерены механические свойства покрытия; показана важность точного определения толщины для корректного измерения характеристик покрытия методом индентирования.

Ключевые слова: шероховатость, твердость, модуль Юнга, измерение толщины покрытия, инструментальное индентирование, сканирующая зондовая микроскопия.

The ion-plasma sprayed titanium nitride (TiN) coating on the prepared 40Cr steel substrate is investigated. A part of the coating surface was covered by the copper foil mask to measure its thickness afterwards. The properties and characteristics of the sample surface microtopography before and after coating deposition are studied by the atomic-force microscopy (AFM). The technique for the high-precision determination of the coating thickness using the results of the AFM scanning of the transition area between the substrate and the coating on the sample surface is described and applied. The calculated uncertainty of the measured value of thickness is significantly less than in other methods. Mechanical properties of the coating are measured by the instrumental indentation method; the significance of an accurate determination of the correct thickness for measuring the coating characteristics by the indentation technique is shown.

Keywords: roughness, hardness, Young's modulus, coating thickness measurement, instrumented indentation, scanning probe microscopy.

Введение. Использование твердых покрытий в различных отраслях современной промышленности позволяет в значительной степени повысить прочностные, функциональные и трибологические характеристики изготавливаемых изделий, что способствует увеличению срока их эксплуатации. Нитрид титана (TiN) широко используется как материал для износостойких, коррозионностойких, защитно-декоративных покрытий, диффузионных барьеров в электронике, тонких пленок электромеханических систем и т. д. Это обусловлено высокими значениями прочностных характеристик нитрида титана, его химической стабильностью, низким коэффициентом трения, высоким сопротивлением коррозии и износостойкостью, а также высокой термостабильностью и адгезией нитрида титана к подложке [1, 2]. Биологическая совместимость нитрида титана позволяет применять его в ортопедии и ортопедической стоматологии. Функциональные свойства покрытий TiN, как и любых других покрытий, в значительной степени определяются их микроструктурой [3], именно поэтому активно исследуется структура подобных покрытий, её зависимость от условий нане-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-07-00343-а, 15-57-04084-Бел_мол_а, 14-07-00271-а, 15-07-05208-а).
** E-mail:evgeniy.sadyrin@gmail.com, boris.mitrin@gmail.com, lkrenev@yandex.ru, saizikovich@gmail.com
*** The research is done with the financial support from RFFI (grants nos. 14-07-00343-a, 15-57-04084-Bel_mol_a, 14-07-00271-a, 15-07-05208-a.)

сения [4–6], а также толщина полученного покрытия. Известны различные методы определения толщины покрытий (группа магнитных методов, ультразвуковой, радиационный, оптический, емкостный, вихретоковый методы [7], использование направленных волн [8] и другие). Однако, точность их невысока в сравнении с вертикальным разрешением современных сканирующих зондовых микроскопов.

Целью настоящего исследования является изучение структуры и особенностей микрогеометрии покрытия TiN на подложке из стали 40Х, определение его толщины с высокой точностью при помощи сканирующего зондового микроскопа, а также определение механических свойств покрытия при помощи техники инструментального индентирования. Подготовка образца для исследования и эксперименты проводились на оборудовании РЦКП НОЦ «Материалы» ДГТУ.

Определение шероховатости подложки. Перед нанесением покрытия была осуществлена пробоподготовка подложки из стали 40Х в несколько этапов с использованием компонентов и оборудования компании Buehler, США:

1. Резка образца линейной прецизионной пилой IsoMet 4000.

2. Шлифовка и полировка образца на шлифовально-полировальном станке MetaServ 250 с силовой головкой Vector LC 250.

а) Шлифовка SiC абразивной бумагой CarbiMet P180 с подачей холодной воды.

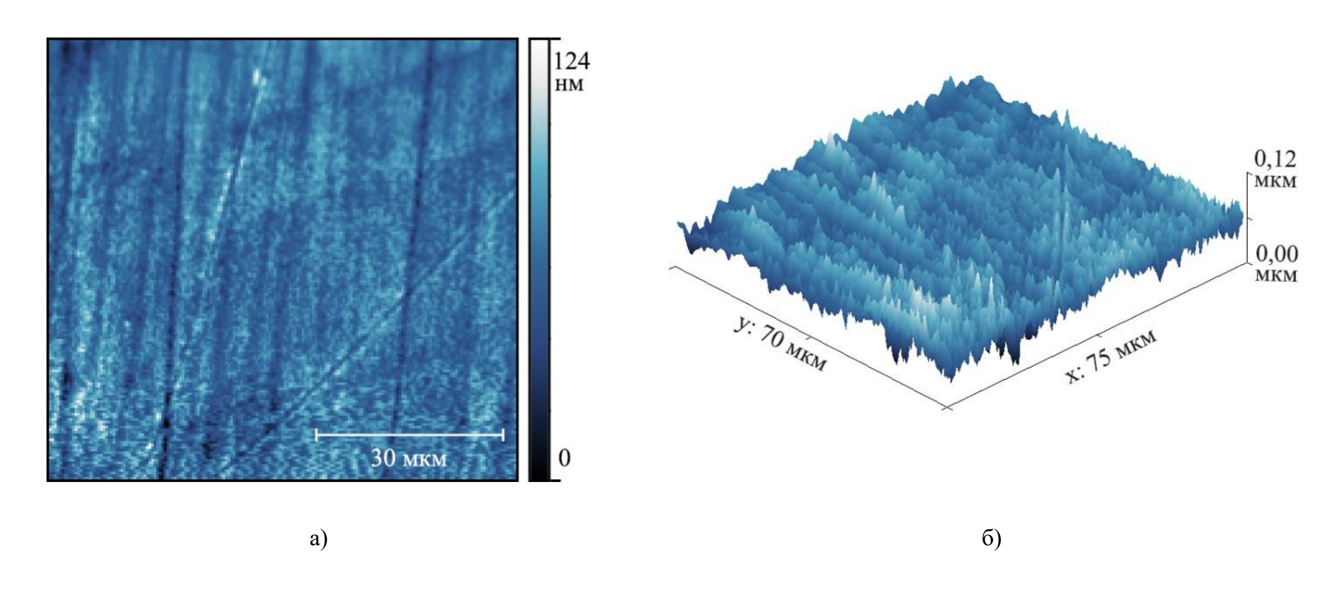
б) Шлифовка SiC абразивной бумагой CarbiMet P400 с подачей холодной воды.

в) Полировка кругом UltraPad (ткань с жестким плетением, без ворса) с использование лубриканта MetaDi Fluid Dialub SW и нано-кристаллической алмазной суспензии MetaDi с частицами: 1) диаметра 9 мкм, 2) диаметра 3 мкм.

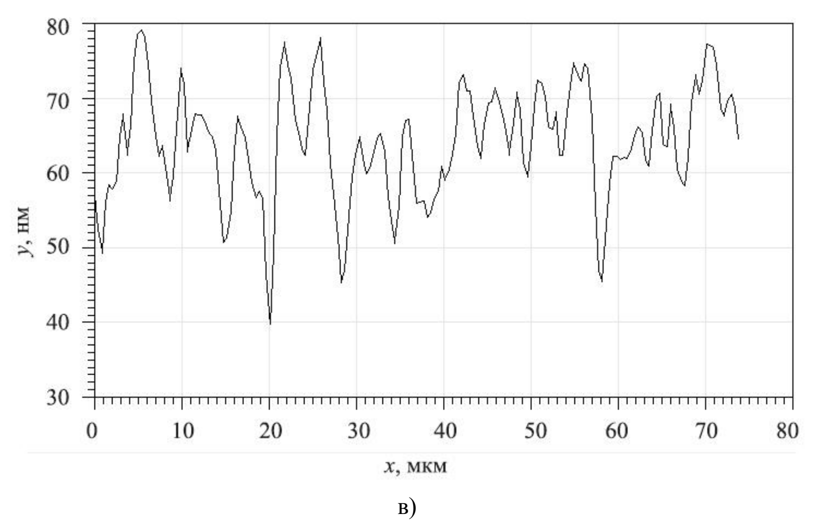
г) Полировка кругом ChemoMet (мягкая пористая химически стойкая синтетическая ткань, без ворса) с использование полировальной суспензии MasterPrep на основе Al_2O_3 (частицы диаметра 0,05 мкм).

В результате была получена зеркальная поверхность образца с максимальной высотой шероховатости R_t = 39,5 нм, и средней шероховатостью R_a = 5,8 нм (рис. 1). Исследование рельефа поверхности проводилось на атомно-силовом микроскопе Nanoeducator (NT-MDT, Россия).

Нанесение покрытия и определение его толщины. Перед нанесением покрытия часть подложки закрывалась маской из медной фольги для последующей оценки толщины покрытия. Покрытие TiN наносилось на установке Булат 6М лаборатории прецизионного литья и вакуумно-плазменных технологий НОЦ «Материалы» ДГТУ. Перед нанесением покрытия для лучшей адгезионной способности подложки образцы нагревались до температуры 550–600 °С и производилась ионная очистка поверхности. Осаждение осуществлялось при напряжении питания подложки 60–65 В и токе 130–140 А. Перед напылением в вакуумной камере создавалось давление ~$1{,}5 \cdot 10^{-8}$ Па, а затем для протекания плазмохимической реакции в камеру подавался азот (до давления ~$1{,}5 \cdot 10^{-7}$ Па) Напыление осуществлялось посредством двух электродуговых испарителей-катодов (верхняя и боковая пушка).



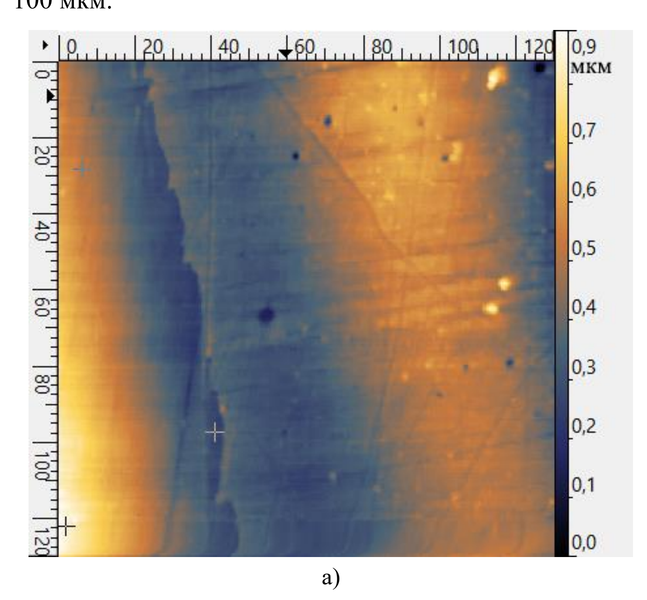
а) б)



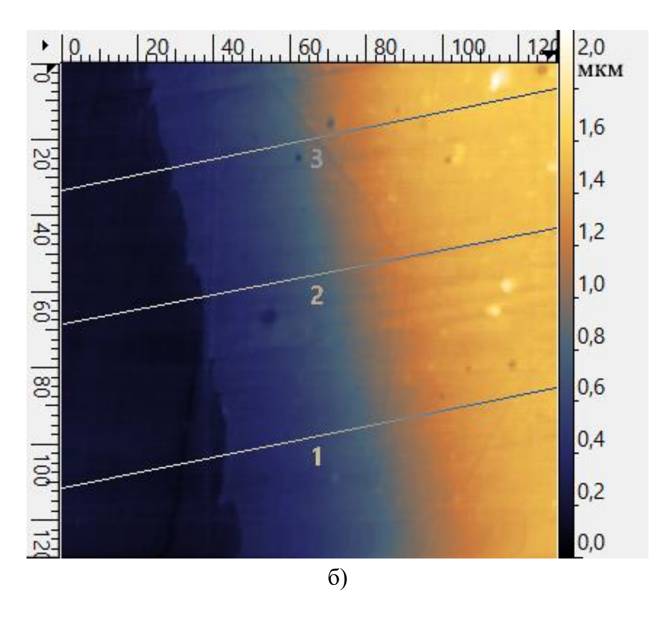
в)

Рис. 1. Рельеф поверхности подложки из стали 40Х: а — двумерное изображение;
б — трехмерное изображение; в — профиль поверхности

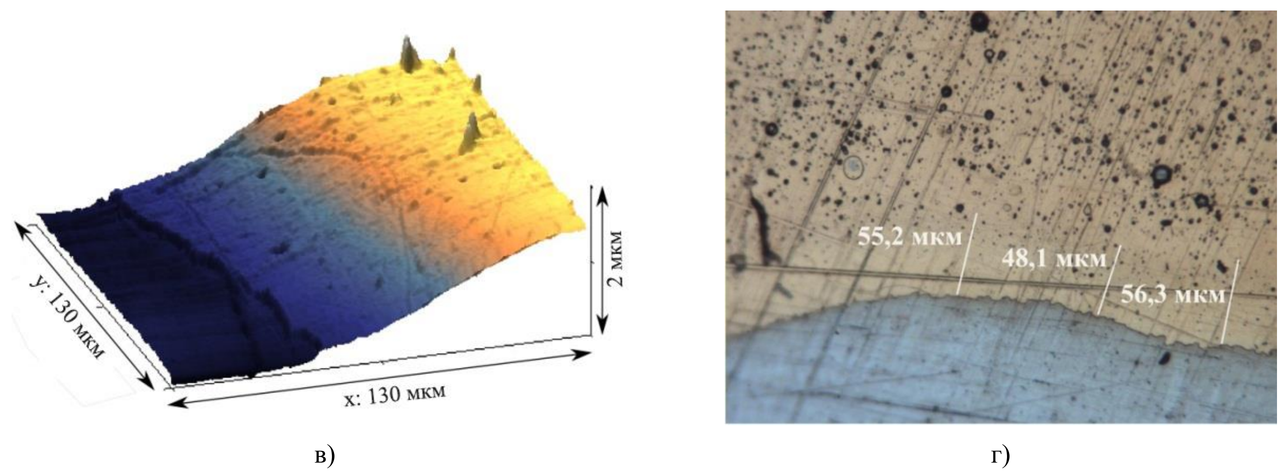
Для определения толщины покрытия было произведено АСМ сканирование поверхности образца на границе теневой маски. Двумерная АСМ-профилограмма, полученная после первоначальной автоматизированной обработки программным обеспечением микроскопа, представлена на рис. 2, а. Дальнейшая обработка осуществлялась в программе Gwyddion [9]. Поскольку толщина покрытия измерялась от уровня подложки, первым шагом обработки являлось вычитание поверхности подложки из полученного изображения. Отполированную подложку можно считать плоской. Как известно, плоскость можно построить по трем точкам пространства. Автоматическое вычитание плоскости в данном случае не дает нужного результата, так как некоторые точки могут попасть на часть изображения, относящуюся к покрытию. Поэтому с помощью инструмента «вычитание плоскости» были выбраны три точки, располагающиеся на подложке. Точки (отмечены знаками «+» на рис. 2, а) выбирались таким образом, чтобы перепад высот в пределах видимости подложки был минимальным. Результат приведен на рис. 2, б и в объёмном виде на рис. 2, в. При сканировании видно подложку, границу покрытия и переходную зону, в пределах которой толщина покрытия постепенно нарастает по мере удаления от границы. Данная переходная зона хорошо заметна и в оптический микроскоп (рис. 2, г). Различимая в оптический микроскоп ширина переходной зоны составляет 50–60 мкм, на АСМ скане — 90–100 мкм.



а)



б)



в) г)

Рис. 2. Поверхность образца вблизи границы теневой маски:
а — АСМ изображение после автоматической обработки; б — после вычитания плоскости;
в — объёмное АСМ изображение; г — изображение, полученное с помощью оптического микроскопа

После вычитания плоскости были извлечены три профиля по линиям, параллельным друг другу и перпендикулярно границе покрытия, таким образом, чтобы линии не пересекали локальные особенности поверхности (выступы и впадины). Линии, вдоль которых извлекались профили, изображены на рис. 2, б. На полученных профилях (рис. 3) видно нарастание толщины покрытия по мере удаления от подложки по сигмоиде, которую можно описать логистической функцией вида

$$z = f(x) = z_0 + \left(\frac{2}{1+e^{(x_0-x)x_k}} - 1\right) z_k\,, \tag{1}$$

где x_0, z_0 — координаты точки перегиба сигмоиды; x_k, z_k — параметры аппроксимации. Предел функции (1) при $x \to \infty$, соответствующий плоскости покрытия, равен $z_0 + z_k$.

Для определения толщины покрытия h из этой величины вычиталась медиана уровня подложки z_m (рис. 3):

$$h = z_0 + z_k - z_m\,.$$

а) б)

Рис. 3. а — линии профиля (—), их аппроксимации (· · ·) и линия уровня подложки (– –);
б — график, аппроксимирующей профиль функции

При этом погрешность определения толщины складывается из среднеквадратического отклонения уровня подложки σ_{z_m} и стандартной ошибки функции профиля $SD_{\tilde{f}}$.

Параметры x_0, z_0, x_k, z_k аппроксимации (1) определялись с помощью метода наименьших квадратов, полученные значения вместе со стандартными отклонениями приведены в табл. 1. Профили вместе с аппроксимирующими их кривыми $z = f_i(x)$ и медианой уровня подложки z_m изображены на рис. 3.

Таблица 1

Параметры аппроксимации полученных профилей функцией (1)

№ профиля	x_0, мкм	z_0, мкм	$x_k \cdot 10^{-5}$	$x_k \cdot 10^{7}$	h_i, мкм	σ_{f_i}, мкм
1	70,743	0,982	6,651	7,235	1,556	0,013
2	75,903	0,919	5,445	7,930	1,562	0,012
3	85,939	0,951	5,966	7,515	1,552	0,010

Для остальных параметров были получены следующие значения: $z_m = 0{,}150$, $\sigma_{z_m} = 0{,}008$, $SD_{\bar{h}} = 0{,}004$, $SD_{\sigma_{\hat{f}}} = 0{,}001$.

В качестве значения толщины принималась выборочное среднее, а ширина доверительного интервала определялась как $\sigma_{z_m} + SD_{\bar{h}} + SD_{\sigma_{\hat{f}}}$. Таким образом, получено значение толщины покрытия $h = 1{,}557 \pm 0{,}013$ мкм.

Предложенный метод плохо подходит для измерений на готовых изделиях, однако, высокая точность позволяет рекомендовать его использование в исследовательских целях, а также для измерения толщины покрытия образцов-свидетелей.

Определение шероховатости покрытия и особенности его структуры. АСМ Nanoeducator был также использован для исследования микрогеометрии поверхности покрытия, результаты которого показаны на рис. 4. Максимальная высота шероховатости составила $R_t = 81{,}5$ нм, при этом средняя шероховатость $R_a = 10{,}7$ нм.

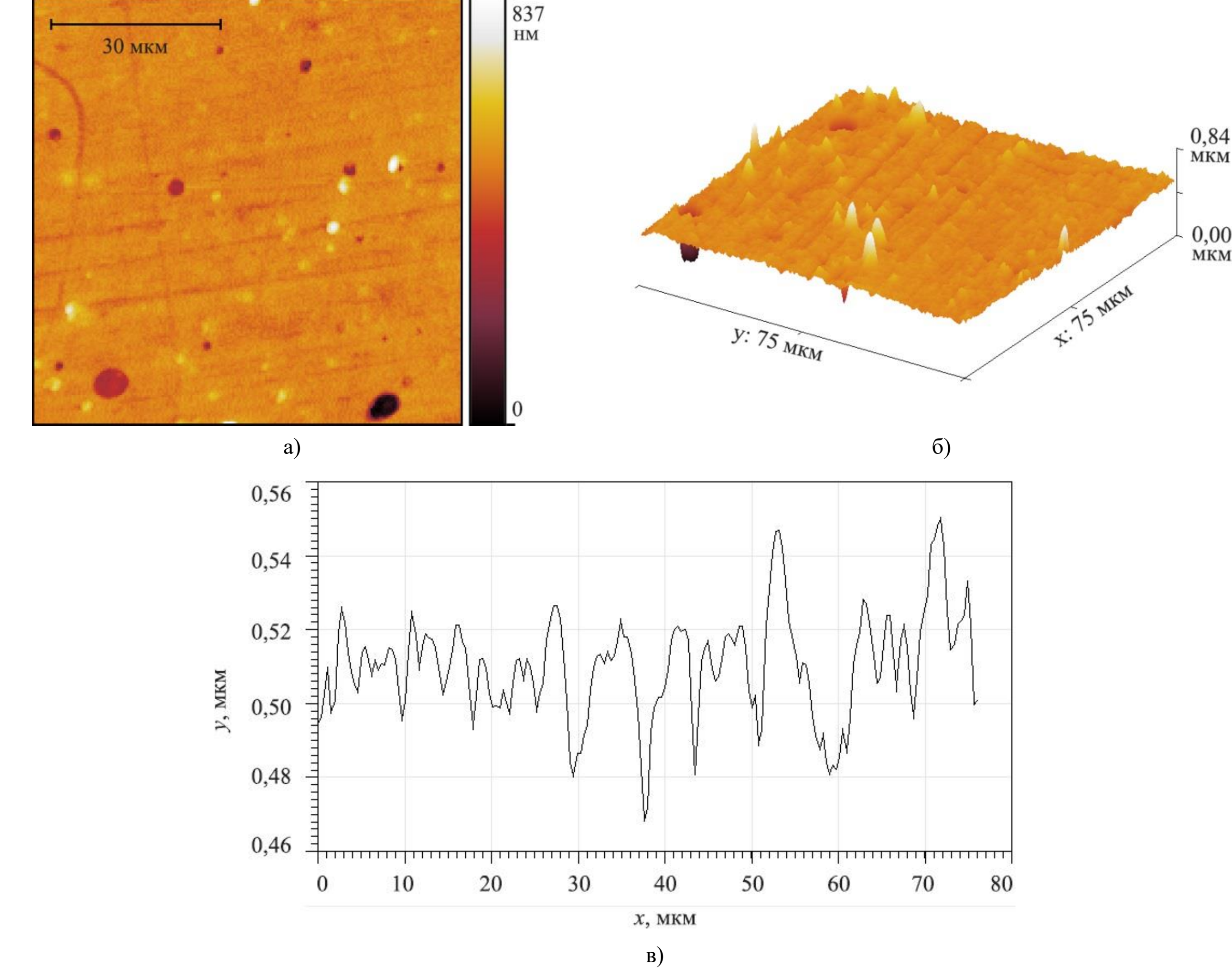
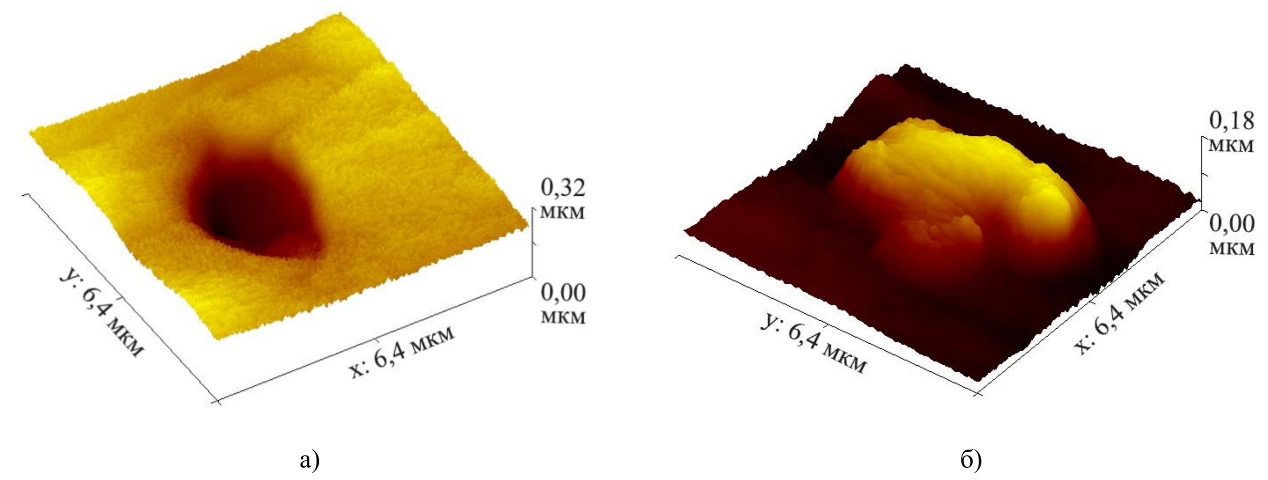


Рис. 4. Рельеф поверхности покрытия TiN на подложке из стали 40Х:
а — двумерное изображение; б — трехмерное изображение; в — профиль поверхности

Кроме периодических микронеровностей на поверхности покрытия обнаружены каверны (рис. 5, а) и закристаллизовавшиеся капли (рис. 5, б), являющиеся артефактами напыления. Методическая особенность проводимых исследований заключалась в том, что области вблизи крупных артефактов исключались из измерений профиля поверхности и механических свойств покрытия.



а) б)

Рис. 5. Особенности микрогеометрии поверхности покрытия TiN: а — каверна, образованная каплей титана, на поверхности покрытия TiN; б — закристаллизовавшаяся капля титана на поверхности покрытия TiN

Исследование механических свойств покрытия. Механические свойства покрытия TiN определялись посредством инструментального индентирования на установке Nanotest Platform 3 (Micro Materials, Великобритания) с использованием функционального блока «Nanotest», позволяющего осуществлять нагрузки в диапазоне от 0,5 мН до 500 мН. Эксперименты проводились в камере, при постоянной температуре. Для обеспечения защиты установки от механических вибраций она устанавливается на виброзащитной платформе с воздушной подушкой. Во всех экспериментах использовался индентор Берковича с алмазным наконечником, предназначенный для проведения экспериментов при температуре до 500 ºС, с радиусом закругления вершины ~ 100 нм.

Оптический микроскоп прибора, позиционно синхронизированный с индентором измерительно-силовой ячейки, использовался не только для наблюдения остаточных отпечатков после полной разгрузки, но и для поиска места нанесения укола, свободного от разного рода поверхностных дефектов (используется 4 объектива, максимальное увеличение 400 крат) [10]. Важно, чтобы на результаты измерений не влияло наличие в области контакта границ образца наплывов и впадин, вызванных предыдущими индентированиями в серии. С этой целью места уколов позиционировались таким образом, чтобы отстоять от границ образца на расстояние минимум трех их диаметров, и минимальное расстояние между отпечатками, как минимум, в пять раз превышало самый большой диаметр отпечатка [11].

Перед проведением экспериментов были проделаны все необходимые калибровки установки (нагрузка, функция площади индентора, податливость установки) на стандартном образце плавленого кварца, проверенные на стандартном образце сапфира. Перед каждым испытанием дополнительно проводилась балансировка маятника и тест сигнала глубины, также непосредственно в начале эксперимента установка выполняла автоматизированную калибровку сигнала глубины в дополнение ко всем калибровкам, проделанным вручную. Параметры эксперимента фиксировались для каждой серии из 20 индентов. Окончательное значение измеряемой величины определялось как выборочное среднее, в качестве доверительного интервала использовалось стандартное (среднеквадратичное) отклонение по выборке.

Анализ результатов в данной работе осуществлялся по методу Оливера – Фарра [12]. Этот метод, взятый в настоящее время за основу многих национальных и международных [13] стандартов для проведения механических испытаний методом непрерывного вдавливания индентора, позволяет корректно определять в широком диапазоне нагрузок механические характеристики материала с учетом реального закругления в вершине пирамидального индентора, упругого прогиба поверхности в области контакта, жесткости силового контура прибора, дрейфов и др.

Перед проведением индентирования покрытия TiN была исследована подложка образца. Время нагрузки-удержания-разгрузки — 30–30–30 с. При нагрузке 500 мН для подложки были определены её микротвердость H (3,17 ± 0,23 ГПа) и модуль Юнга E (212,19 ± 4,9 ГПа).

По результатам экспериментов по инструментальному индентированию покрытия TiN установлена зависимость определяемых методом Оливера – Фарра значений модуля Юнга и твердости от нагрузки и глубины внедрения, которая иллюстрируется рис. 6 и табл. 2.

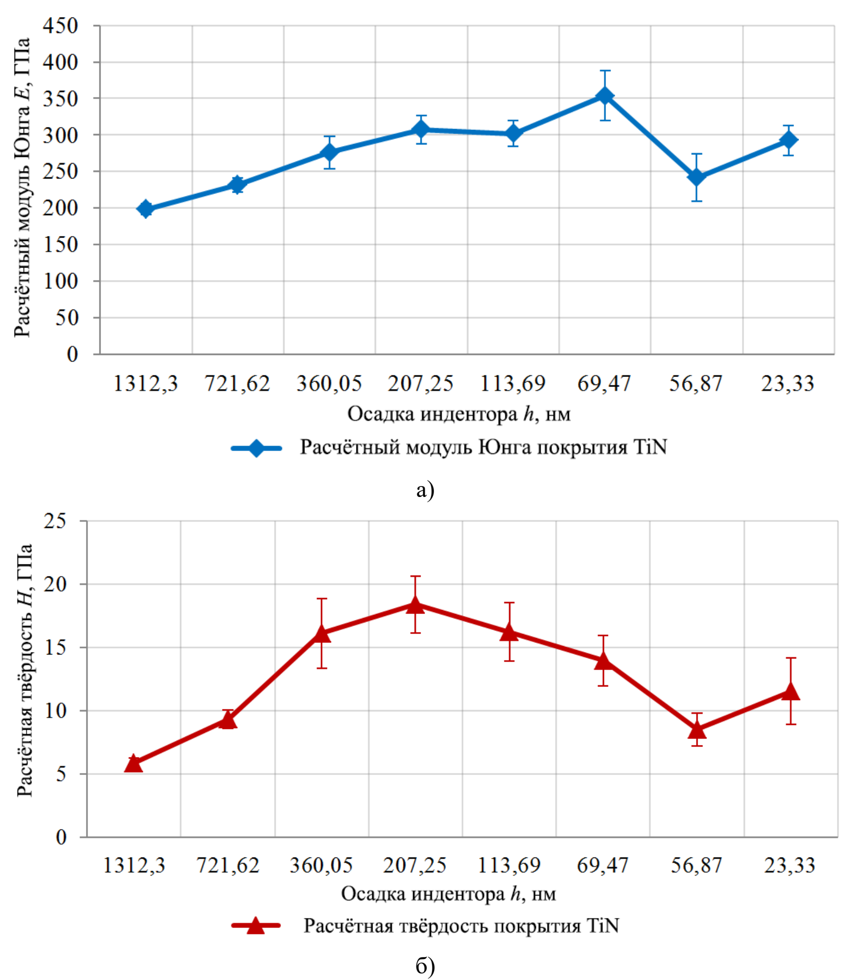


Рис. 6. Зависимость расчетных твердости (а) и модуля Юнга (б) покрытия TiN, определенных из эксперимента по индентированию, от глубины внедрения

Для корректного определения механических свойств покрытия учитывалась необходимость соблюдения следующих условий согласно [13]:

1. Толщина испытуемого образца должна превышать глубину индентирования минимум в 10 раз (что также отмечено в [11]).

2. Для ограничения вклада шероховатости поверхности в неопределенность результата измерения глубины индентирования, глубина внедрения должна соответственно быть больше, как минимум в 20 раз, средней арифметической шероховатости R_a.

Таблица 2

Результаты серии экспериментов по инструментальному индентированию покрытия TiN

P, мН	h, нм	E, ГПа	H, ГПа
200	1312,30 ± 42,74	198,20 ± 7,5	5,85 ± 0,43
100	721,62 ± 29,98	231,92 ± 9,65	9,32 ± 0,72
50	360,05 ± 32,7	276,06 ± 22,45	16,10 ± 2,75
25	207,25 ± 15,66	307,81 ± 19,37	18,38 ± 2,25
10	113,69 ± 8,95	302,04 ± 17,44	16,20 ± 2,3
5	69,47 ± 6,4	353,61 ± 34,21	13,94 ± 2
2,5	56,87 ± 5,77	241,71 ± 32,14	8,52 ± 1,3
1	23,33 ± 2,42	292,86 ± 20,54	11,53 ± 2,64

Из рис. 6, а и табл. 2 видно, что расчетное значение модуля Юнга (если не принимать во внимание результаты при глубине внедрения $h < 20R_a$) убывает по мере увеличения глубины вдавливания и приближается к значению, полученному для подложки, что соответствует усилению влияния упругих свойств подложки на результат эксперимента.

С учетом того, что толщина покрытия составляет h = 1,557 ± 0,013 мкм, при этом R_a = 10,7 нм, корректными результатами для данной толщины можно считать результаты, полученные при силе внедрения P = 25 мН (глубина внедрения при этом составила h = 207,25 ± 15,66 нм). Таким образом, модуль Юнга покрытия TiN, определенный в соответствии с [13], составил E = 307,81 ± 19,37 ГПа.

Поведение величины твердости индентирования (рис. 6, б) в зависимости от глубины внедрения имеет более сложный характер. Несмотря на то, что данные, полученные при нагрузках 25, 50, 100, 200 соответствуют определению микротвердости по [13], между полученными при 200 и 25 мН значениями наблюдается трехкратное различие. Поэтому говорить о микротвердости покрытия безотносительно величины приложенной нагрузки в данном случае некорректно. Определенный практический смысл имеет сравнение твердости покрытия и подложки при одинаковой нагрузке. Так, при нагрузке 200 мН нанесение покрытия приводит к увеличению твердости индентирования в 1,5 раза: с 3,58 до 5,85 ГПа, а при 50 мН в 4 раза: 4,02 до 16,10 ГПа.

Выводы. Изучены механические свойства, структура, толщина и особенности микрогеометрии покрытия TiN на подложке из стали 40Х. Рассчитана шероховатость и определены особенности микроструктуры покрытия, которые необходимо учитывать при проведении экспериментов. Предложен метод определения толщины покрытия с помощью атомно-силовой микроскопии, демонстрирующий высокую точность. Показано, что возможность точного измерения модуля Юнга покрытия методом Оливера – Фарра возможно в ограниченном диапазоне глубин воздействия, так как при глубинах, сопоставимых с величиной средней шероховатости, возрастает неопределенность результатов измерений, а при увеличении глубины вдавливания определяемое значение модуля Юнга стремится к таковому для подложки. Комплексное АСМ-исследование обеспечивает выбор корректной глубины воздействия для определения модуля Юнга покрытия при инструментальном индентировании. Результаты эксперимента показали, что нанесение покрытия привело к увеличению микротвердости образца в 1,5–4 раза при различной величине приложенной нагрузки. Было определено значение модуля Юнга покрытия TiN, которое составило 307,81 ± 19,37 ГПа.

Библиографический список

1. Zhang, S. TiN coating of tool steels: a review / S. Zhang, W. Zhu // Journal of Materials Processing Technology. — 1993. — Vol. 39. — P. 165–177.

2. Кудряков, О. В. Комплексная индент-диагностика металлокерамических нанокомпозиционных покрытий / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2014. — Т. 80, № 11. — С. 48–53.

3. Наноструктурные и нанокомпозитные сверхтвердые покрытия / А. Д. Коротаев [и др.] // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8, № 5. — С. 103–116.

4. Hainsworth, S. V. The effect of the substrate on the mechanical properties of TiN coatings / S. V. Hainsworth, W .C. Soh // Surface and Coatings Technology. — 2003. — Vol. 163–164. — P. 515–520.

5. Titanium nitride/vanadium nitride alloy coatings: mechanical properties and adhesion characteristics / B. A. Latella [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2006. — Vol. 200. — P. 3605– 3611.

6. Влияние давления азота при осаждении сверхтвердых TiN покрытий на их свойства / А. А. Андреев [и др.] // Физическая инженерия поверхности. — 2007. — Т. 5, № 3—4. — С. 203–206.

7. Состояние методов и средств контроля толщины покрытий (обзор) / С. Н. Глоба [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». — 2014. — № 19 (1062). — С. 84–112.

8. Non-destructive evaluation of coating thickness using guided waves / P.-C. Ostiguy [et al.] // NDT & E International. — 2015. — Vol. 76. — P. 17–25.

9. Nečas, D. Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis / D. Nečas, P. Klapetek // Cent. Eur. J. Phys. — 2012. — Vol. 10, iss. 1. — P. 181–188.

10. Головин, Ю. И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикрообъемах (обзор) / Ю. И. Головин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2009. — Т. 75, № 1. — С. 45–59.

11. Bull, S. J. New developments in the modelling of the hardness and scratch adhesion of thin films / S. J. Bull, D. S. Rickerby // Surface and Coatings Technology.— 1990. — Vol. 42. — P. 149–164.

12. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research.— 1992. — Vol. 7, iss. 6. — P. 1564–1583.

13. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний: ГОСТ Р 8.748 — 2011 (ИСО 14577-1:2002) / Государственная система обеспечения единства измерений. — Москва : Стандартинформ, 2013. — 24 с.

References

1. Zhang, S., Zhu, W. TiN coating of tool steels: a review. Journal of Materials Processing Technology, 1993, vol. 39, pp. 165–177.

2. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Kompleksnaya indent-diagnostika metallokeramicheskikh nanokompozitsionnykh pokrytiy. [Integrated Indentation Tests of Metal Nanocomposite Coatings.] Industrial laboratory. Material diagnostics. 2014, vol. 80, no. 11, pp. 48–53 (in Russian).

3. Korotayev, A.D., et al. Nanostrukturnye i nanokompozitnye sverkhtverdye pokrytiya. [Nanostructured and nanocomposite superhard coatings.] Physical Mesomechanics, 2005, vol. 8, no. 5, pp. 103–116 (in Russian).

4. Hainsworth, S.V., Soh, W.C. The effect of the substrate on the mechanical properties of TiN coatings. Surface and Coatings Technology, 2003, vol. 163–164, pp. 515–520.

5. Latella, B.A., et al. Titanium nitride/vanadium nitride alloy coatings: mechanical properties and adhesion characteristics. Surface and Coatings Technology, 2006, vol. 200, pp. 3605– 3611.

6. Andreev, A.A., et al. Vliyanie davleniya azota pri osazhdenii sverkhtverdykh TiN pokrytiy na ikh svoystva. [The effect of nitrogen pressure on the properties of superhard TiN coatings during their deposition.] Physical Surface Engineering, 2007, vol. 5, no. 3-4, pp. 203–206 (in Russian).

7. Globa, S.N., et al. Sostoyanie metodov i sredstv kontrolya tolshchiny pokrytiy (obzor). [State of methods and control facilities of coating thickness (survey).] Vestnik NTU “KhPI”, 2014, no. 19 (1062), pp. 84–112 (in Russian).

8. Ostiguy, P.-C., et al. Non-destructive evaluation of coating thickness using guided waves. NDT & E International, 2015, vol. 76, pp. 17–25.

9. Nečas, D., Klapetek, P. Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis. Cent. Eur. J. Phys., 2012, vol. 10, iss. 1, pp. 181–188.

10. Golovin, Y.I. Nanoindentirovanie kak sredstvo kompleksnoy otsenki fiziko-mekhanicheskikh svoystv materialov v submikroob"emakh (obzor). [Nanoindentation as a comprehensive assessment of physical and mechanical properties of materials in sub-microvolumes (survey).] Industrial laboratory. Material diagnostics. 2009, vol. 75, no. 1, pp. 45–59 (in Russian).

11. Bull, S.J., Rickerby, D.S. New developments in the modelling of the hardness and scratch adhesion of thin films. Surface and Coatings Technology, 1990, vol. 42, pp. 149–164.

12. Oliver, W.C., Pharr, G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. Journal of Materials Research, 1992, vol. 7, iss. 6, pp. 1564–1583.

13. National Uniform Measurement Assurance System. Metally i splavy. Izmerenie tverdosti i drugikh kharakteristik materialov pri instrumental'nom indentirovanii. Chast' 1. Metod ispytaniy: GOST R 8.748 — 2011 (ISO 14577-1:2002) [Metals and alloys. Measurement of hardness and other properties of materials under tool indentation. Part 1. Test method: State standard P 8.748 — 2011 (ISO 14577-1: 2002)] Moscow: Standartinform, 2013, 24 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 17.09.2015
Сдана в редакцию 20.09.2015
Запланирована в номер 23.09.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621. 398-583 DOI 10.12737/16077

Исследование точности позиционирования автоматизированного пневмопривода с внешним тормозным устройством*

Дао Тхе Ань[1], В. С. Сидоренко[2], Д. Д. Дымочкин[3]**

[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study on positioning accuracy of automated pneumatic drive with an outer brake***

Dao The Anh[1], V. S. Sidorenko[2], D. D. Dymochkin[3]**

[1, 2, 3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель данной работы — представить схемотехническое решение автоматизированного пневмопривода (АПП) с внешним тормозным устройством. В качестве такого устройства выступает управляемый пневмомеханический тормоз, обеспечивающий сокращение длительности процесса позиционирования, повышение точности останова и надежную фиксацию механизма в заданных координатах. Использование экспериментально исследуемого привода с автоматизированным измерительным комплексом создает условия для осциллографирования процесса позиционирования в реальном времени и пространстве, а также обеспечивает достоверные результаты эксперимента. Авторами создан специальный стенд — модель предлагаемого привода, позволяющая исследовать влияние точности позиционирования предлагаемого привода при различных параметрах его функционирования. Установлены кинематические и силовые характеристики привода при автоматическом управлении потоком сжатого воздуха. В результате выявлено влияние скорости позиционирования и управляющего давления тормоза на точность привода. Сформулированы рекомендации для разработки реальных позиционных приводов повышенного быстродействия и точности позиционирования. Установлено, что при работе с настоящими позиционными приводами введение внешнего тормозного устройства — управляемого пневмомеханического тормоза повышает точность позиционирования в 1,25–2,25 раза.

Ключевые слова: позиционный пневмопривод, силовые характеристики, тормозное устройство, быстродействие, точность, скорость позиционирования, кинематические характеристики, внешнее тормозное устройство.

The work objective is to introduce a design of the automated pneumatic drive (APD) with an external braking gear. It is a controlled pneumo-mechanic brake providing the process time reduction, the positioning accuracy increase, and the reliable positioning of the stop mechanism in the setpoints. The application of the prototype drive with the automated measurement complex creates conditions for the oscillographic testing of the positioning process in real time and space, and it also provides reliable experiment results. The authors have created a special stand – a model of the proposed drive that allows investigating the effect of its positional accuracy under different parameters of its operation. Kinematic and power characteristics of the drive in the automatic operation by the compressed air flow are identified. The effect of the positioning speed and the brake control pressure on the drive accuracy is resulted. Recommendations for the development of real positional drives with increased performance and positioning accuracy are formulated. It is found that the introduction of an outer braking device – the controlled pneumo-mechanic brake – improves the positioning accuracy of these drives by 1,25-2,25 times.

Keywords: position actuator, power characteristics, braking gear, performance, accuracy, positioning speed, kinematic characteristics, external brake.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: daoanh2010@mail.ru, vsidorenko@dstu.edu.ru, dydedmi_77_06_02@mail.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. В условиях современных производств возрастают требования к быстродействию и точности позиционирования пневмопривода. Данную задачу решает автоматизированный пневмопривод с оригинальным датчиком перемещения и внешним тормозным устройством. Использование указанной конструкции позволяет заметно улучшить качество управления позиционным циклом.

Известно, что имеющие фиксированные структуры электропневматические позиционные приводы ограничены по мощности, точности и быстродействию. Это затрудняет их применение в условиях интенсификации технологических и рабочих процессов машин. При оценке эффективности рассматриваемого класса механизмов особые требования предъявляются к точности работы, быстродействию, устойчивости режимов функционирования. Главным образом учитываются такие параметры, как масса, скорость, координаты.

В качестве основных функциональных требований к позиционному пневмоприводу рассматриваются:

— регулирование и стабилизация скорости исполнительных движений;

— оптимальный режим перехода с ускоренных перемещений на рабочие;

— задание перемещений и их отработка с требуемой точностью в режиме установочных, вспомогательных и транспортных перемещений при изменяющихся нагрузках, скоростях;

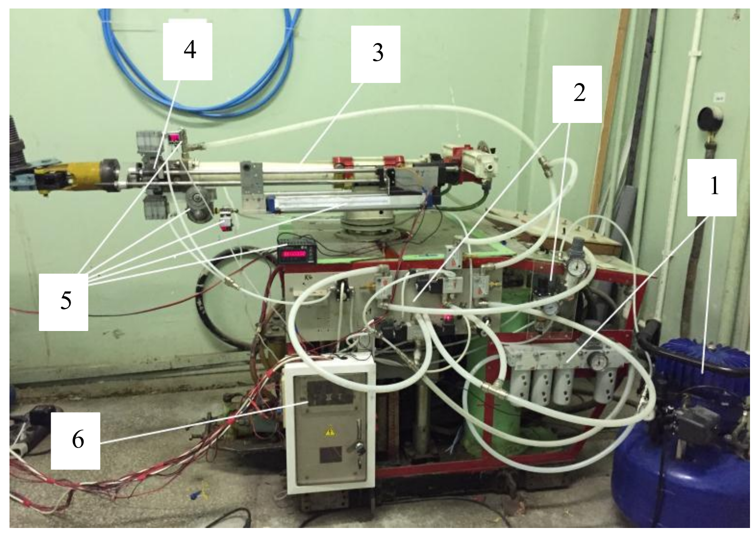
— оптимальные рабочие процессы в заданном диапазоне силовых, кинематических и динамических параметров;

— фиксирование исполнительных механизмов в точке позиционирования для сохранения точности позиционирования при последующих внешних воздействиях на механизмы.

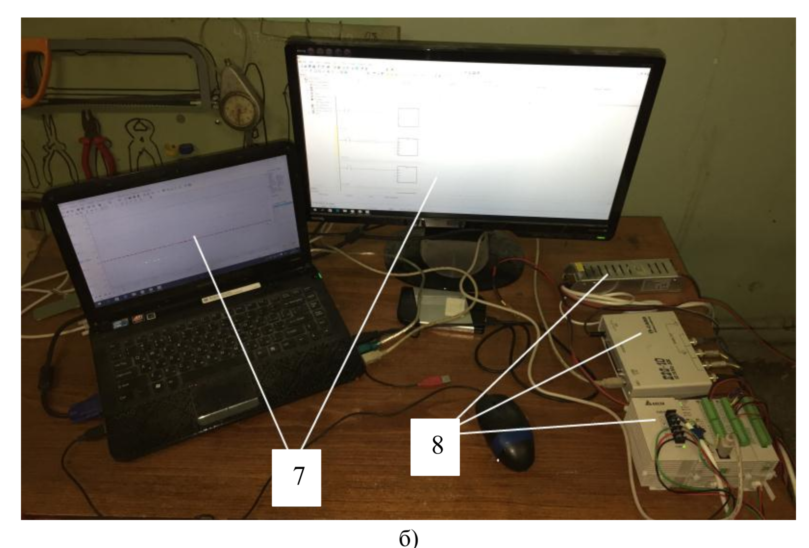
В настоящие время производители позиционных приводов (Camozzi, SMC, Festo, Pneumax, Air torque), как правило, обеспечивают торможение и позиционирование с использованием внутренних тормозных устройств, управляющих потоками сжатого воздуха [1, 2, 3, 4]. Основные недостатки таких систем связаны со сложностями управления потоками сжатого воздуха (как правило, нестационарно сжатыми) из-за изменяющихся свойств и параметров состояния рабочей среды. Итальянская компания Camozzi предлагает внешнее торможение в виде гидроамортизатора, гидродемпфера. Однако такие конструкции рационально применять для жестких позиционных циклов с ограниченным числом координат позиционирования. Что же касается многокоординатых перемещений, то в этом случае необходимы другие решения [5].

Основная часть. Для реализации обозначенных выше задач предлагается схемотехническое решение автоматизированного позиционного пневмопривода с оригинальным датчиком перемещения и внешним тормозным устройством — управляемым пневмомеханическим тормозом [6, 7]. Разработана обобщенная математическая модель такого привода, позволяющая моделировать процесс позиционирования и установить влияние основных параметров механизма на быстродействие и точность позиционирования [7, 8]. Адекватность процессов, описываемых данной моделью, подтверждается экспериментом. Решение соответствующей задачи дает возможность спланировать и осуществить многофакторный эксперимент для определения рациональных параметров быстродействия и точности настройки пневмомеханического привода (с учетом перемещаемой массы, скорости позиционирования, координат перемещения привода и управляемого давления тормоза).

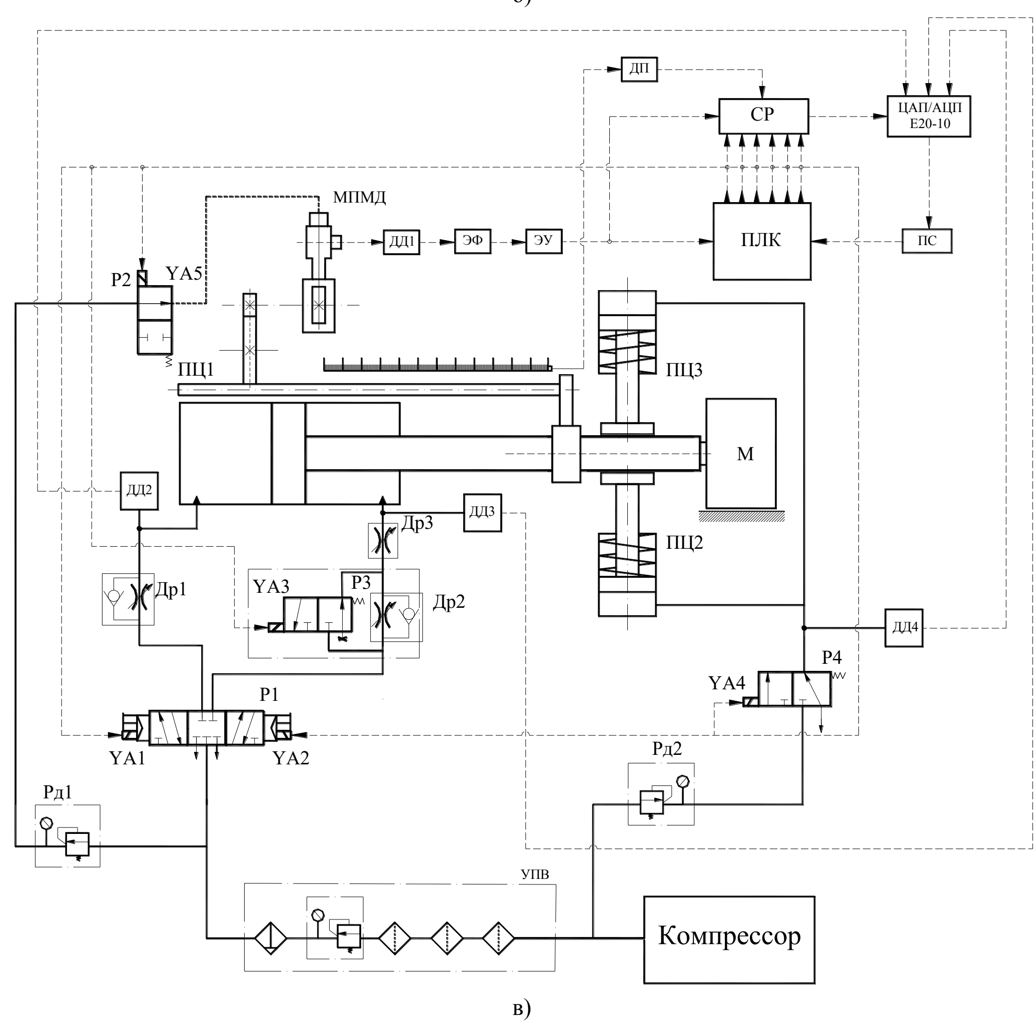
Стенд-модель для исследования АПП представлена на рис. 1. Схема стенда исследования позиционного пневмопривода (рис. 1, в) поясняет принцип действия стендового привода, являющегося макетом реального позиционного пневмопривода.



а)



б)



в)

Рис. 1. Стенд — модель АПП. Общий вид: 1 — энергическая подсистема; 2 — управляемые устройства; 3 — пневмоцилиндр; 4 — пневмомеханическое тормозное устройство; 5 — измерительный комплекс; 6 — электрическая панель (а). Автоматизированный управляемый комплекс: 7 — персональный компьютер; 8 — блок управления (б). Схема стенда: УПВ — узел подготовки воздуха; Рд1, Рд2 — регуляторы давления; YA1, YA2, YA3, YA4, YA5 — электромагниты; Р1, Р2, Р3, Р4 — пневмораспределители; Др1, Др2, Др3 — пневмодроссели с обратным клапаном; ДД1, ДД2, ДД3, ДД4 — датчики давления; ПЦ1 — силовой пневмоцилиндр; ПЦ2, ПЦ3 — пневмоцилиндры торможения; М — приведенная масса; МПМД — многопараметрический пневмомеханический датчик; ЭФ — электрическая фильтрация; ЭУ — электрический усилитель; ПЛК — программируемый логический контроллер; ДП — датчик перемещения; СР — система резисторов; ЦАП/АЦП Е20-10 — аналого-цифровой преобразователь; ПС — персональный компьютер (д)

Принцип работы схемы стенда описан в [6]. Стенд оснащен автоматизированным измерительным комплексом, обеспечивающим сбор и обработку информации о состоянии и функционировании привода. Программируемый логический контроллер (ПЛК) служит для:

— организации позиционного цикла;

— задания координат для переключения управления циклом и остановом;

— формирования управляющих сигналов на электромагнитах пневмораспределителей в соответствии с заложенным алгоритмом управления позиционным циклом привода.

Многопараметрический пневмомеханический датчик передает информацию о перемещении исполнительного механизма стенда и позволяет преобразовать перемещение пневмоцилиндра в импульсные электрические сигналы.

Установлены два регулятора расхода для фиксирования давления, подаваемого на датчик и тормоз. Пневмомеханическая подсистема стенда позволяет исследовать представленные в табл. 1 параметры позиционного пневмопривода.

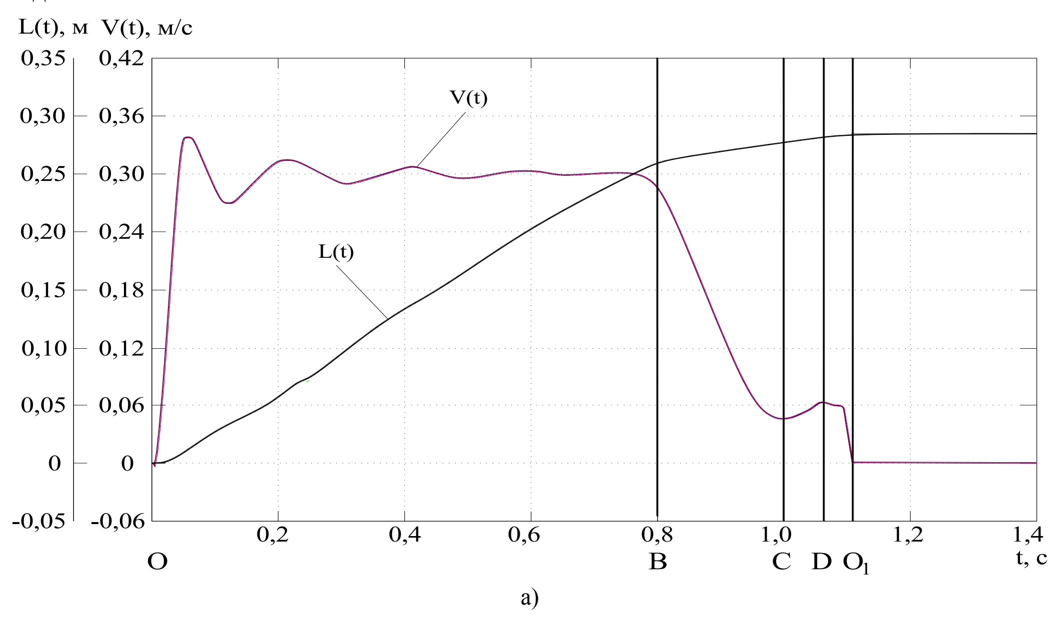
Таблица 1

Диапазоны варьирования основных параметров позиционного пневмопривода

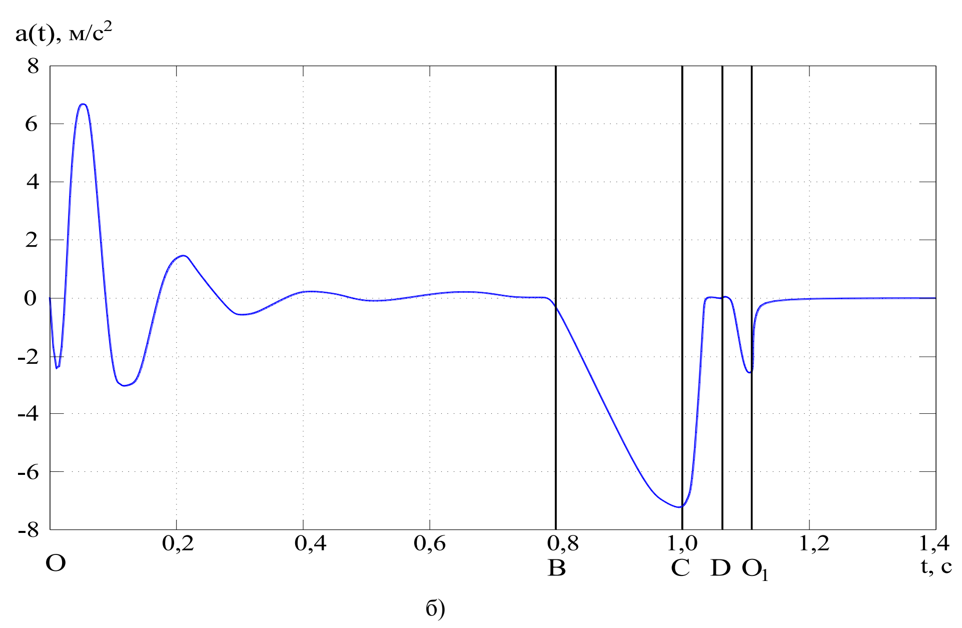
Наименование параметров	Диапазон
Скорость позиционирования, мм/с	10–100
Рабочее давление в пневмосистеме, бар	2–8
Перемещаемая масса, кг	5–17
Координата точки позиционирования, мм	80–300
Температура в пневмосистеме, К	273–310
Скорость быстрого подвода привода м/с	До 0,4

Гидравлические и кинематические характеристики пневмоцилиндра измерялись датчиками. Выбег $L_в$ пневмоцилиндра определялся при преобразовании перемещения L в число импульсов давлений датчика. Давление в напорной, сливной линиях и цилиндрах торможения в нестационарном режиме исследовалось с помощью датчиков давления ДД2, ДД4 с погрешностью измерения 1 % от номинального диапазона. Рабочая температура — 273 ^{0}K–323 ^{0}K, влияние температуры — ±3 % от номинального диапазона.

На рис. 2 представлены осциллограммы типового позиционного цикла АПП, фиксирующие изменение основных параметров привода.



а)



б)

Рис. 2. Осциллограммы экспериментального автоматизированного пневмопривода с внешним тормозным устройством: V(t) — скорость привода; L(t) — перемещение привода; a(t) — ускорение привода

Исследуемый позиционный цикл характерен для горизонтального движения схвата промышленного робота. После подачи команды на начало рабочего цикла осуществляются: быстрый подвод движения OB, замедление до скорости позиционирования BD, останов DO_1.

С учетом результатов осциллографирования выполнялась статистическая обработка по методу наименьших квадратов. Результаты измерены в соответствии с известными критериями [9, 10].

Точность позиционирования привода определяется величиной выбега $L_в$ и его рассеиванием $\Delta L_в$ при повторных перемещениях. При незначительном рассеивании $\Delta L_в$ принимали $\Delta L_{поз} = L_в$:

$$\Delta L_{поз} = L_в + \Delta L_в, \qquad (1)$$

где $L_в$ — положительный выбег гидроцилиндра, мм; $\Delta L_в$ — рассеивание выбега, мм.

Результаты вычислительного и натурного экспериментов исследования позиционного цикла при различных значениях параметров позволили установить, каким образом управляющее давление P_{toz} влияет на точность позиционирования предлагаемого АПП. Влияние скорости позиционирования $V_{пзi}$ на точность позиционирования оценивалось с помощью коэффициента замедления $k_з$, определяемого выражением:

$$k_{зi} = \frac{V_{пзi}}{V_{бп}}, \qquad (2)$$

где $V_{бп}$ = 0,3 м/с — скорость быстрого подвода; $V_{пзi}$ — скорость позиционирования после замедления.

На рис. 3 представлены графики зависимости точности и длительности позиционирования от коэффициента замедления $k_з$ при управляющем давлении тормоза P_{toz} = 5 бар. При удовлетворительном совпадении результатов вычислений и натурных экспериментов установлено их существенное влияние на длительность $T_о$ и точность позиционирования $L_в$. Так, при увеличении скорости позиционирования в 4 раза (от 0,025 м/с до 0,1 м/с) длительность позиционирования уменьшается в 4,5 раза и точность снижается в 4,2 раза. В зоне устойчивого позиционирования АПП исследовано влияние скорости $V_{пзi}$ на точность позиционирования (область Z_1).

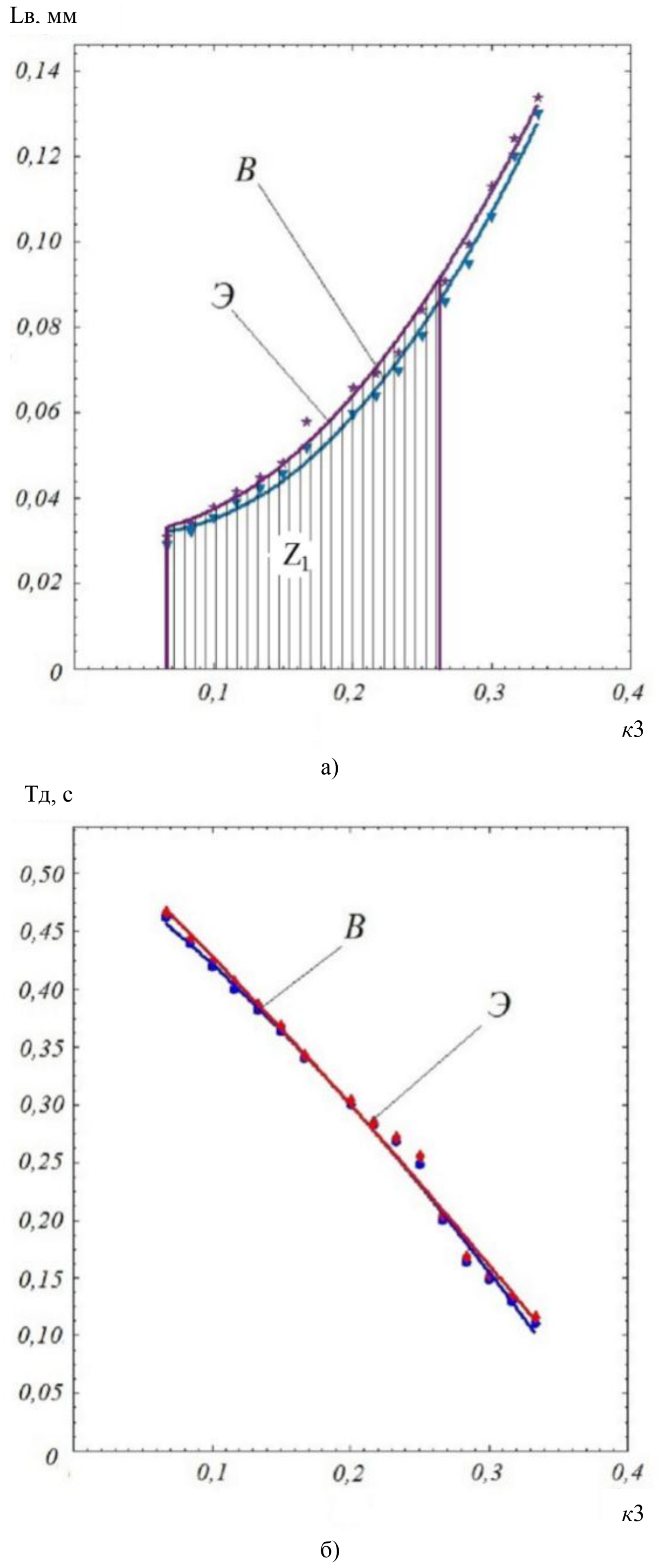


Рис. 3. Влияние коэффициента замедления $k_з$ на процесс позиционирования: влияние на точность позиционирования (а); влияние на длительность позиционирования (б); В — вычисления; Э — эксперимент

На рис. 4 представлены графики зависимости точности позиционирования привода от управляющего давления тормоза P_{toz} при скорости $V_{пзi}$ = 50 мм/с.

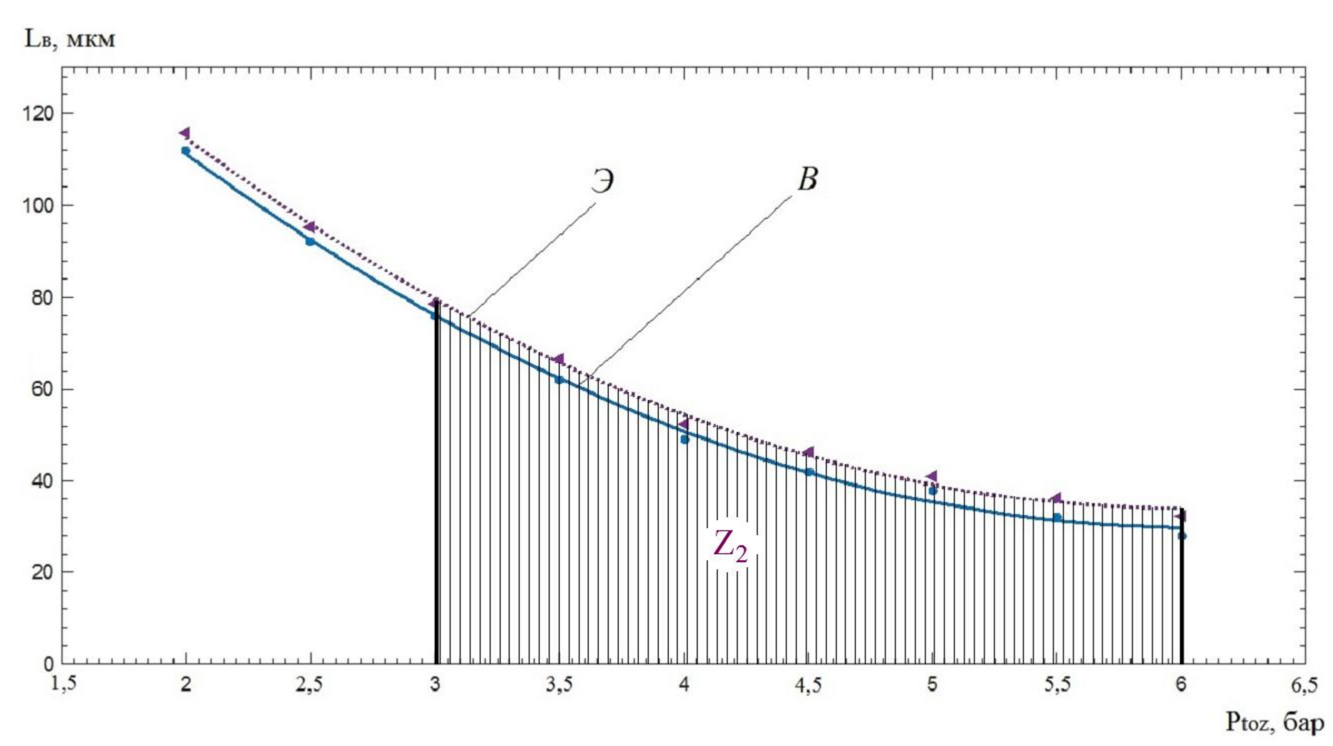


Рис. 4. Зависимость точности позиционирования АПП от управляющего давления тормоза: В — вычисления, Э — эксперимент

На рис. 4 видно, что при увеличении тормозного давления в 3 раза точность позиционирования повышается в 2,95 раза. Зона устойчивого позиционирования определяется в области Z_2.

Полученные результаты демонстрируют качественное и количественное решение задачи данного исследования. Таким образом, можно утверждать, что цель работы достигнута. Это, в свою очередь, позволяет предложить практические рекомендации для разработки и эксплуатации реальных позиционных автоматизированных пневмоприводов с внешним тормозным устройством.

В зонах устойчивого позиционирования автоматизированного пневмопривода (см. рис. 3, 4) точность позиционирования составляет 40–80 мкм, что в 1,25–2,25 раза выше, чем у серийно выпускаемых приводов (например, у компаний Camozzi, Festo она составляет 100 мкм).

Выводы. Экспериментальные исследования пневмопривода на стенде-модели подтверждают его работоспобность при реализации различных позиционных циклов.

Установлена зависимость точности позиционирования от основных параметров пневмопривода и внешнего тормозного устройства (скорость позиционирования, управляющее давление тормоза).

При удовлетворительном совпадении результатов вычислительного и натурного экспериментов подтверждается адекватность обобщенной математической модели привода. Определены зоны устойчивого позиционирования процесса автоматизированного пневмопривода, необходимые при разработке и настройке реальных автоматизированных пневмоприводов.

Библиографический список

1. Taghizadeh, M. Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications / M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi // Comptes Rendus Mécanique at ScienceDirect.com. — 2009. — Vol. 337. — P. 131–140.

2. Wang, J. Energy Optimal Control of Servo-Pneumatic Cylinders through Nonlinear Static Feedback Linearization / Jihong Wang, T. Gordon // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. — 2012. — № 5. — Vol. 134. — P. 1–11.

3. Modelling and Controller Design of Electro-Pneumatic Actuator Based on PWM / Behrouz Najjari [et al.] // International Journal of Robotics and Automation. — 2012. — Vol. 1, № 3. — P. 125–136.

4. Falcão Carneiro, J. A high-accuracy trajectory following controller for pneumatic devices / J. Falcão Carneiro, F. Gomes de Almeida // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2012. — № 61. — P. 253–267.

5. Camozzi. Большой каталог. Пневматическая аппаратура. Версия 8.5 / Camozzi spa. — Москва : Салта ЛТД, 2012. — С. 1070.

6. Дао Тхе Ань. Многопараметрический пневмомеханический датчик позиционных пневмоприводов [Электронный ресурс] / Дао Тхе Ань, В. С. Сидоренко, Д. Д. Дымочкин // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 2. — Режим доступа: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3055 (дата обращения 15.06.15).

7. Дао Тхе Ань. Моделирование процессов позиционирования быстродействующего пневмопривода робота / Дао Тхе Ань, В. С. Сидоренко // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 7, часть 2. — С. 285–292.

8. Dao The Anh. Dynamics of position fast robot with pneumatic drive of brake unit / Dao The Anh, V. S. Sidorenko, D. D. Dymochkin // Dynamics and vibroacoustics of machines : conference. — Samara, September 15–17, 2014. — Vol. 3. — P. 176–183.

9. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион ; под ред. Э. К. Лецкого, Е. В. Марковой. — Москва : Мир, 1981. — 516 с.

10. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. — Москва : Высшая школа, 1988. — 239 с.

References

1. Taghizadeh, M., Ghaffari, A., Najafi, F. Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications. Comptes Rendus Mécanique at ScienceDirect.com. 2009, vol. 337, iss. 3, pp. 131–140.

2. Wang, J., Gordon, T. Energy Optimal Control of Servo-Pneumatic Cylinders through Nonlinear Static Feedback Linearization. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2012, vol. 134, iss. 5, pp. 1–11.

3. Najjari, B., et al. Modelling and Controller Design of Electro-Pneumatic Actuator Based on PWM. International Journal of Robotics and Automation, 2012, vol. 1, no. 3, pp. 125–136.

4. Falcão Carneiro, J., Gomes de Almeida, F. A high-accuracy trajectory following controller for pneumatic devices. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, vol. 61, iss. 1, pp. 253–267.

5. Camozzi. Bol'shoy katalog. Pnevmaticheskaya apparatura. Versiya 8.5. [Camozzi. Large catalogue. Pneumatic facilities. Version 8.5.] Camozzi spa. Moscow: Salta LTD, 2012, 1070 p. (in Russian).

6. Dao The Anh, Sidorenko, V.S., Dymochkin, D.D. Mnogoparametricheskiy pnevmomekhanicheskiy datchik pozitsionnykh pnevmoprivodov. [Multiparameter pneumo-mechanical sensor of positional pneumatic drives.] Inzhenernyy vestnik Dona, 2015, no. 2. Available at: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3055 (accessed: 15.06.15) (in Russian).

7. Dao The Anh, Sidorenko, V.S. Modelirovanie protsessov pozitsionirovaniya bystrodeystvuyushchego pnevmoprivoda robota. [The study of the dynamical system high-speed pneumatic robot position.] Fundamental research, 2015, no. 7, part 2, pp. 285–292 (in Russian).

8. Dao The Anh, Sidorenko, V.S., Dymochkin, D.D. Dynamics of position fast robot with pneumatic drive of brake unit. Dynamics and Vibroacoustics of Machines: Proc. 2nd Int. Conf. Samara, September 15–17, 2014, vol. 3, pp. 176–183.

9. Johnson, N., Lion, F. Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody planirovaniya eksperimenta. [Statistics and Experimental Design in Engineering and Science. Methods of Experimental Design.] Letskiy, E.K., Markova, E.V., eds. Moscow: Mir, 1981, 516 p. (in Russian).

10. Lvovskiy, E.N. Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul. [Statistical methods for constructing empirical formulas.] Moscow: Vysshaya shkola, 1988, pp. 239 (in Russian).

Поступила в редакцию 11.09.2015
Сдана в редакцию 11.09.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.896 DOI 10.12737/16053

Теплофизические, диффузионные и сегрегационные процессы в зоне фрикционного контакта *

И. В. Колесников[1**]

[1] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Thermophysical, diffusion, and segregation processes in the frictional contact zone ***

I. V. Kolesnikov[1**]

[1] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Расчет температурного поля для трибосистемы колесо - тормозная композиционная колодка подвижного состава показал, что максимальное значение температуры в колесе находится не на поверхности, а на расстоянии 200-1000 мкм от поверхности трения. При трении в результате термомеханической деструкции полимерной колодки выделяется водород, который адсорбируется и поглощается контактирующей поверхностью колеса. При этом максимум концентрации водорода совпадает с максимум температуры. Представлены результаты по исследованию сегрегационных явлений легирующих и примесных элементов на границах зерен железа. Показано, что основой кинетического условия самоорганизации на антифрикционном трибоконтакте является согласованность скоростей образования пленки переноса и ее разрушение. Энергия связи атомов различных элементов с поверхностью зерен находится в периодической зависимости от атомного номера элементов. Этот факт может служить теоретической базой для прогнозирования прочностных свойств стали с различным составом легирующих и примесных элементов. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения методов рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии (РЭС, ОЭС) квантовой химии при решении трибологических задач.

Ключевые слова: температура, диффузия, сегрегация, пленка переноса.

The calculation of the temperature field for the tribosystem of wheel - composition brake shoe of the rolling stock has shown that the maximum temperature in the wheel is not on the surface, but at 200-1000 micron distance from the friction surface. Under friction, as a result of the thermomechanical destruction of the polymer shoe there evolves hydrogen that is absorbed by the contact surface of the wheel. At that, the maximum hydrogen concentration coincides with the maximum temperature. The research results of the segregation phenomena of alloying and impurity elements in the iron grain boundaries are presented. It is shown that the consistency of the rates of the transfer film formation and its destruction is the kinetic condition of self-organization on the antifriction tribocontact. The atomic-binding energy of different elements to the grain surface is a periodic function of the atomic numbers of the elements. This may serve as a theoretical basis for predicting the strength properties of steel with a different composition of alloying and impurity elements. The obtained results indicate the promising application of XPS and AES of quantum chemistry in solving tribological tasks.

Keywords: temperature, diffusion, segregation, transfer film.

Введение. Выяснение особенностей поведения поверхностных слоев, как металлического, так и металлополимерного трибоконтакта — одна из центральных задач в триботехнике. Поэтому для процессов, происходящих в местах контактирования металлополимерных сопряжений необходимо разработать не только методы диагностики, но и более полные теоретические модели, специфическое назначение которых, с одной стороны — учитывать изменения, происходящие в объеме и в пограничном слое, а с другой — приводить к простым инженерным расчетам.

Поэтому на первом этапе наших исследований была разработана методика расчета температурного поля — температуры и температурного градиента в поверхностных слоях фрикционного сопряжения. Установление теоретических представлений о механизме возникновения температурного градиента дает возможность выяснить закономер-

* Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00116).
** E-mail: oooedt@rambler.ru
*** The research is supported by RFFI grant (project no. 14-29-00116).

ности его влияния на трибоэлектрические, диффузионные и сегрегационные процессы, протекающие на фрикционном контакте.

Желание определить температурное поле в поверхностных слоях трибоконтакта классическим методом приводит к необходимости решения краевых сингулярно возмущенных задач — задач с малым параметром при старшей производной [1]. Для асимптотического решения сингулярно возмущенных задач обычно используют метод Вишика-Люстерника или методы сращиваемых многомасштабных разложений [2]. Авторами для нахождения температурного поля в погранслоях трибосистемы применен метод регуляризации сингулярно возмущенных задач, разработанный С.А. Ломовым [3]. Этот метод, объединяющий в себе идеи двух вышеназванных методов, обладает рядом преимуществ по сравнению с каждым из них в отдельности и является, естественно, более прогрессивным. Суть его — в регуляризации сингулярно возмущенных задач с помощью перехода в пространство безрезонансных решений, которое индуцируется исходной задачей. Это индуцированное пространство определяется по спектральным характеристикам исходного оператора, что дает возможность использовать спектральную теорию операторов. Сингулярность исходной задачи влечет за собой появление ненулевого ядра у главного оператора индуцированной задачи.

Расчет температурного поля. В настоящее время установилась единая точка зрения, что определяющим фактором эксплуатационного режима металлического и металлополимерного сопряжения является тепловая напряженность в узле трения.

Расчет температурного поля проведен для конкретного сопряжения — колесно-тормозной колодки подвижного состава как наиболее характерной и широко распространенной трибосистемы "вал-частичный подшипник" (рис. 1).

Будем считать, что колесо представляет собой диск радиуса R и толщины 2h (рис. 1). Введем цилиндрическую систему координат (r, φ, z) и обозначим через $T(r, \varphi, z, t)$ температуру в точке колеса с координатами (r, φ, z) в момент времени t. Рассмотрим случай установившегося процесса: колесо вращается с постоянной угловой скоростью ω и сила прижатия колодок к колесу в процессе торможения не меняется. При этих допущениях функция T (r, φ, z, t) является периодической по времени с периодом π/ω (две колодки). Можно считать, что колесо неподвижно, а колодки вращаются вокруг него с той же скоростью ω против часовой стрелки. Оставаясь в рамках основных принципов, сформулированных к настоящему времени исследователями в области термического трибоконтакта, источником тепла будем считать тончайшие непрерывные поверхностные слои, непосредственно примыкающие к фактической площади контакта каждого из трущихся тел, образующие как бы одну систему.

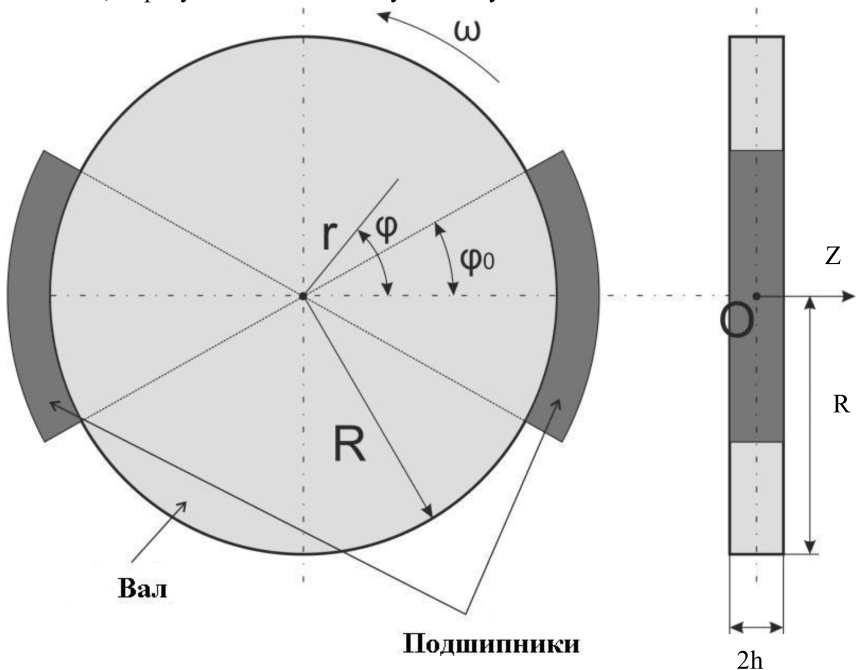


Рис. 1. Схема металлополимерной трибосистемы" вал-частичный подшипник"

При этих допущениях и условии изотропности материала колеса уравнение теплопроводности будет иметь вид:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=\frac{C\cdot\rho}{\lambda}\frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где C — удельная теплоемкость материала колеса; λ — теплопроводность; ρ — плотность; C, ρ и λ считаем постоянными.

Перейдем к формулировке граничных условий. На торцах $(z=\pm h)$ происходит свободный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи α_z

$$\pm\lambda\frac{\partial T}{\partial z}+\alpha_z\left(T-T_c\right)=0,\quad z=\pm h, \tag{2}$$

где T_c — температура окружающей среды.

На цилиндрической поверхности (r = R) под колодками происходит генерация тепла

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial z}=Q,\quad r=R,$$

$$\varphi\in\left[-\varphi_0+\omega t,\varphi_0+\omega t\right]\cup\left[\pi-\varphi_0+\omega t,\pi+\varphi_0+\omega t\right], \tag{3}$$

где $Q=k_{TP}P\upsilon K$ (k_{mp} — коэффициент трения, P — удельная нагрузка на колодку, υ — линейная скорость вращения колеса, K — коэффициент разделения тепловых потоков).

На остальных участках цилиндрической поверхности осуществляется свободный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи α_r

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial r}+\alpha_r\left(T-T_c\right)=0,\quad r=R,$$

$$\varphi\notin\left[-\varphi_0+\omega t,\varphi_0+\omega t\right]\cup\left[\pi-\varphi_0+\omega t,\pi+\varphi_0+\omega t\right]. \tag{4}$$

В результате проведенного расчета установлено, что практически сразу после выхода поверхности катания колеса из-под колодки возникает приповерхностный максимум температуры, который постепенно смещается вглубь колеса [4]. Максимальный перепад температуры наблюдается в диапазоне углов от 2π/5 до π/5. При этом максимум находится на расстоянии 200…1000 мкм от поверхности катания.

Диффузионные процессы. Известно, что при трении в результате термомеханической деструкции полимеров в зоне контактирования с металлом выделяются различные по своей природе твердые, жидкие и газообразные продукты, среди которых большое количество водорода. Водород, в свою очередь, адсорбируется и активно поглощается контактирующей поверхностью металла, что ведет к ее разрушению и переносу твердых частиц металла с этой поверхности на более мягкий полимерный материал. Установлено, что способствует этому три фактора — градиент концентрации, градиент механических напряжений и градиент температуры.

Для оценки влияния температурного поля на профиль концентрации водорода рассмотрена однородная металлическая пластина толщиной l, на гранях которой (Z = 0 и Z = l) поддерживаются постоянными величины температур T_0, T_1 и концентраций n_0, n_1. Будем также считать процесс диффузии водорода в пластину установившимся. Тогда задача расчета концентрации водорода является одномерной, стационарной и сводится к решению следующего уравнения (4)

$$-D\frac{dn}{dz}-D\cdot n\cdot Q\frac{1}{kT^2}\frac{dT}{dz}=g_0, \tag{5}$$

при граничных условиях

$$n(0)=n_0,\qquad n(1)=n_1. \tag{6}$$

Здесь D — коэффициент диффузии, выраженный формулой

$$D=D_0e^{-\frac{E_a}{kT}}, \tag{7}$$

где D_0 — коэффициент диффузии при комнатной температуре; Q — теплота переноса; E_a — энергия активации; k — постоянная Больцмана; g_0 — поток водорода — величина неизвестная, подлежащая определенно в процессе решения задачи; T — температура, является функцией от Z.

В результате проведенных расчетов установлено, что максимум концентрации водорода практически совпадает с максимумом температуры; величина концентрации в точке максимума не зависит от уровня концентрации и от абсолютной величины температуры на правой нерабочей поверхности образца (при Z = l) (рис. 2).

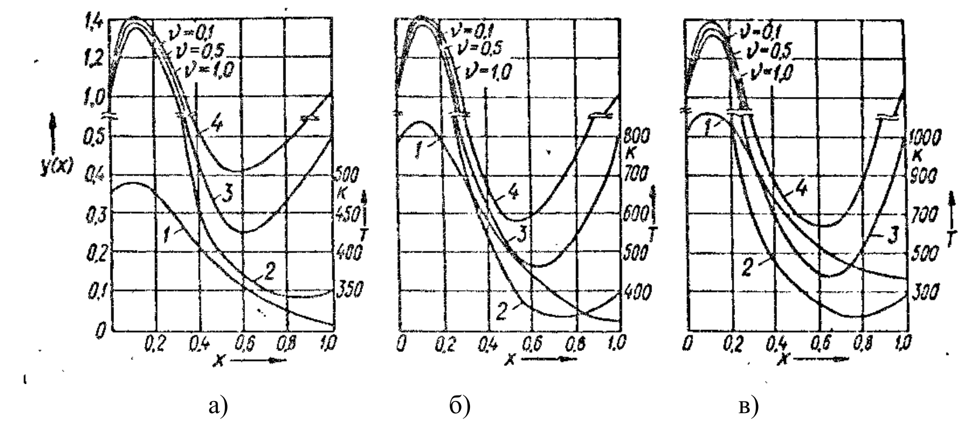


Рис. 2. Изменение концентрации водорода в пластине при T_0 = 473 К (а); T_0 = 773 К (б) и T_0 = 1073 К (в), $\nu = n_0/n_1$

Для подавления водородного износа в узлах сухого трения разработаны следующие меры [4]:

1. Меры, препятствующие проникновению водорода в металлическое тело;
2. Меры, блокирующие выделение водорода из полимерной композиции;
3. Меры, приводящие к связыванию водорода в прочные химические соединения.

Введением в колесную сталь хрома, ванадия, никеля снижается концентрация биографического водорода, а добавлением в композицию структурирующих агентов достигается невозможность выделения водорода из самой композиции. Введение во фрикционные пластмассы закиси меди, фтористого кальция приводит к уменьшению потока водорода в стальное контртело путем связывания водорода в зоне трения.

Перечисленные меры отодвигают границу катастрофического водородного разрушения сопряженных с пластмассой или смазкой металлических поверхностей.

Сегрегационные процессы. Другим фундаментальным процессом на трибоконтакте, помимо диффузии, является сегрегация, определяющая кинетику и механизм поверхностных явлений на микроуровне [5–11].

С помощью квантовой химии изучены типы химических соединений, возникновение и изменение химических связей на поверхности трущихся тел и на этой основе детально описано поведение материалов на атомном уровне в различных условиях трения. Как показали наши исследования, речь идет, в первую очередь, о явлении зернограничной сегрегации, в результате которой атомы примесных и легирующих элементов выходят на границы зерен, и последствиях этого явления, что впервые предпринималось в трибологии.

Зернограничная сегрегация (ЗГС) — это явление, присущее твердым многокомпонентным материалам, состоящим из микрокристаллитов (зерен). Оно заключается в том, что атомы некоторых элементов, растворенных в объеме зерен, с течением времени выходят на поверхность зерен (т.е. на их границу).

Перестройка структуры границы зерен влияет на термодинамические, кинетические, механические свойства поликристаллических материалов. Как правило, граница зерен является наименее прочной частью зерен. Поэтому состояние границы и явления, связанные с ЗГС, играют существенную роль в процессах разрушения. Из сказанного выше вытекает, что износостойкость стали и других поликристаллических материалов во многом определяется свойствами границ между зернами поверхностных слоев. Хотя эти слои по структуре зерен могут существенно отличаться от внутренних областей поликристаллов, механизмы разрушения поверхности и внутренних областей имеют много общего.

Существуют различные точки зрения на то, каким образом сегрегированные атомы способствуют разрушению. Одна из гипотез базируется на том, что в процессе зернограничной сегрегации связь металл-металл заменяется на более слабую или более сильную связь металл-сегрегированный атом. Этот факт дает основание полагать, что величина энергии связи атомов во многом определяет способность сегрегированных атомов ослаблять или упрочнять границы зерен.

Появившиеся в последние десятилетия методы квантово-химических расчетов, основанные на приближении теории функционала плотности (DFT), позволяют провести анализ атомных взаимодействий, влияющих на разрушение металлов. Взаимодействие атомов на границах зерен и его влияние на износостойкость поверхностных слоев ста-

ли изучались нами с помощью пакета программ ADF, основанного на приближении DFT. Этот пакет дает возможность рассматривать соединения переходных металлов, включающие сотни атомов, что важно для применений в случае стали.

Взаимодействия между зернами при наличии сегрегированных атомов исследовалось с помощью двух моделей — модели многоатомного кластера и модели двупериодической пластины. Совпадение результатов, получаемых в рамках этих двух существенно различающихся моделей, свидетельствует о точности результатов.

Цель проводимого анализа — убедиться, что появление сегрегированных атомов на межкристаллитных границах является не сопутствующим эффектом, а одной из основных причин ослабления прочности связи между кристаллитами и последующего за этим разрушения поверхностного слоя металла.

Многоатомный кластер, имитирующий сегрегацию в поликристаллическом материале, должен, очевидно, содержать некоторое количество атомов матрицы (из прилегающих слоев двух соседних зерен), а также сегрегированных или продиффундировавших атомов, расположенных на границе. Размер кластера должен быть достаточно большим, чтобы с его помощью возможно точнее воспроизводились основные качественные и количественные закономерности сегрегации. Однако практика квантово-химических расчетов показывает, что во многих случаях кластеры сравнительно малых размеров на качественном и полуколичественном уровнях могут воспроизводить особенности изучаемого явления.

При моделировании условий, при которых происходит сегрегация, использовали тот известный факт, что на наиболее узком участке границы между зернами в поликристалле (т.е. в месте контакта зерен) ширина границы составляет величину порядка постоянной решетки. Это позволило рассмотреть следующую простую модель границы (рис. 3а): в многоатомном кластере железа (на рисунке изображен 30-атомный кластер) атомы из среднего слоя заменены сегрегированными атомами. При этом два верхних и два нижних слоя имитируют соответственно верхнее и нижнее зерна поликристалла, а средний слой представляет собой границу между зернами. Будем называть такой кластер сегрегационным. Кластер, который содержит только атомы *Fe*, моделирует чистый металл.

Безусловно, такая модель не учитывает всего разнообразия условий, важных для процесса сегрегации и проблемы износостойкости (к таким условиям можно отнести наличие неоднородностей на поверхностях кристаллитов, непараллельность поверхностей, наличие дислокаций и многое другое). Основное назначение предлагаемой модели — во-первых, оценить влияние ближайшего атомного окружения на химическую связь между сегрегированными атомами и атомами матрицы в месте контакта зерен, и, во-вторых, изучить, как эта связь влияет на прочность микроскопических областей и поверхностных слоев поликристалла.

Если в этой модели убрать атомы двух верхних слоев (рис. 3б), то оставшиеся атомы (нижние слои + слой примесных атомов) имитируют явление адсорбции на поверхности железа с индексом Миллера (100). Такой кластер будем называть адсорбционным.

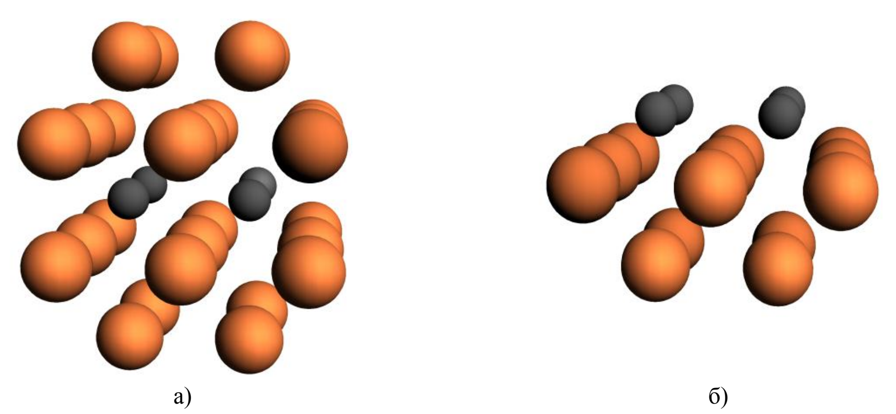


Рис. 3. Кластеры железа с сегрегированными атомами (а) и адсорбированными атомами (б). Крупные кружки соответствуют атомам Fe, мелкие — сегрегированным атомам

В соответствии с экспериментальными данными о характере разрушения границы предполагалось, что модельная система (сегрегационный кластер рис. 4а) в результате силового воздействия может распадаться на две части (рис. 4). Одна из них состоит из атомов только одного зерна (кластер из чистого железа рис. 4б), а другая — из атомов другого зерна и слоя сегрегированных атомов (адсорбционный кластер рис. 4в).

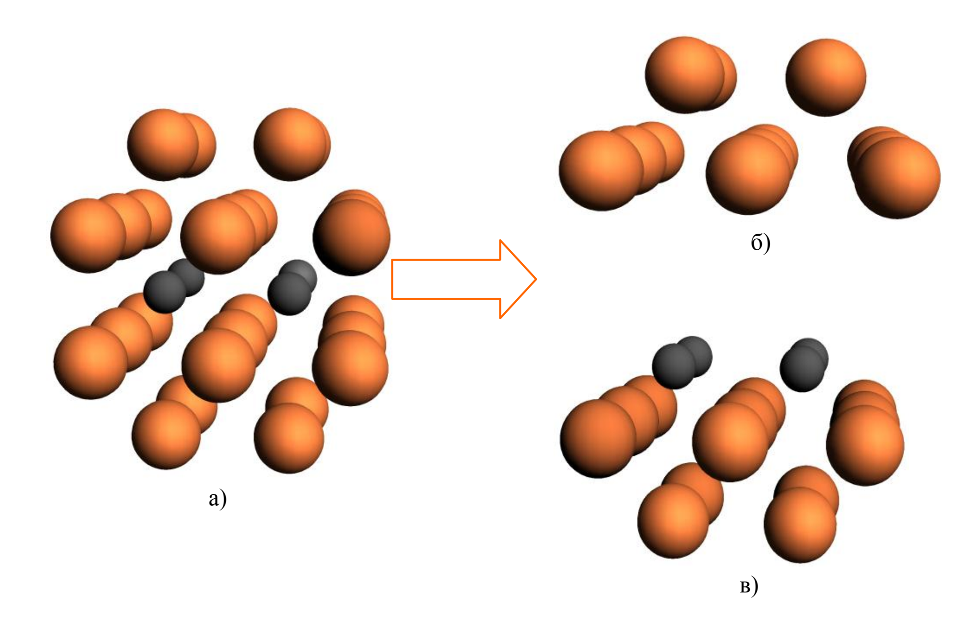


Рис. 4. Распад сегрегационного кластера на кластер из чистого железа
и адсорбционный кластер: а — кластер железа с сегрегированными атомами;
б — кластер из чистого железа; в — кластер железа с адсорбированными атомами

Нами проводились расчеты для кластеров, состоящих из 18 и 30 атомов. В качестве рассчитываемых характеристик были выбраны энергия связи $E_{св}$ кластера и межатомные расстояния. Полученная с помощью пакета ADF энергия связи кластера, взятая по модулю, приближенно представляет собой энергию, которую нужно затратить для разрыва всех связей в кластере. Как известно, результаты расчётов энергии сильно зависят от выбранного приближения. Поэтому вычисления для всех исследованных объектов проводились единообразно. В расчётах применялся базис TZ2P и использовались "замороженные" остовные орбитали. Для проверки чувствительности расчётов к методу вычисления энергии применялись две разные схемы. Для 18-атомных кластеров использовалось приближение LDA (приближение локальной плотности), а для 30-атомных — нелокальное приближение GGA BLYP.

Были проведены расчеты энергии связи $E_{св}$ кластеров, которые содержат адсорбированные и сегрегированные атомы всех химических элементов из четырех периодов таблицы Менделеева, с порядковыми номерами от 1 до 36 (от водорода до криптона). Эти дополнительные атомы размещались либо на внешней поверхности кластера (в случае адсорбции), либо в среднем слое (в случае сегрегации). В обоих случаях рассматривалось положение дополнительных атомов над центрами квадратов из атомов железа (позиция fourfold) или над сторонами этих квадратов (позиция twofold).

Зная энергии связи адсорбционных и сегрегационных кластеров, можно рассчитать энергию E_d, необходимую для разрыва (распада) кластера с образованием двух частей, имитирующих зерна в модельном кластере. Ее значения определяются по формуле:

$E_d = |E_s - E_g - E_a|$, (1)

где E_s — энергия связи сегрегационного кластера, содержащего два зерна и граничный слой между ними, E_g — энергия связи кластера, состоящего из одного зерна, E_a — энергия связи адсорбционного кластера, состоящего из зерна и граничного слоя. По этой же формуле можно рассчитать и энергию разрыва кластера из чистого железа, полагая, что 30-атомный кластер $Fe_{13}Fe_4Fe_{13}$ делится на фрагменты $Fe_{13}Fe_4$ и Fe_{13}.

Таблица 1

Энергия распада (в эВ) сегрегационных кластеров $Fe_{13}X_4Fe_{13}$ (X = H, …, Kr)

			I	II	V	VI	VII	VIII			0
1	H 3,3										He 0
2	Li 3,1	Be 8,4	B 9,4	C 7,0	N 5,4	O 2,1	F				Ne 0
3	Na 3,0	Mg 4,8	Al 6,4	Si 6,0	P 4,8	S 1,9	Cl				Ar 0
4	K 1,8	Ca 3,7	Sc 4,5	Ti 8,5	V 9,4	Cr 11,2	Mn 8,8	Fe 10,4	Co 10,3	Ni 8.2	
	Cu 6,3	Zn 5,4	Ga 5,1	Ge 4,6	As 3,2	Se 2,1	Br				Kr 0

Табл. 1 фактически отражает совместимость различных элементов с железом на его зернограничных поверхностях. Для элементов начала периода их связь с железом слабая (по сравнению со связью Fe–Fe), но с ростом номера элемента она вначале увеличивается, а затем во второй половине периода уменьшается. При перемещении вдоль группы связь, как правило, ослабевает. Это означает, что свойства химической связи различных элементов с железом находятся в периодической зависимости от заряда ядра атомов, что соответствует периодическому закону Д.И. Менделеева.

На рис. 5 данные из табл. 1 для большей наглядности представлены в графической форме. Здесь же для сравнения приведены результаты расчёта для 18-атомных кластеров, для которых использовалось приближение LDA. Наиболее существенный вывод, вытекающий из сравнения двух кривых на рис. 5, состоит в том, что обе кривые в значительной степени подобны. Чётко видна однотипная периодическая зависимость энергии распада кластеров от порядкового номера элементов.

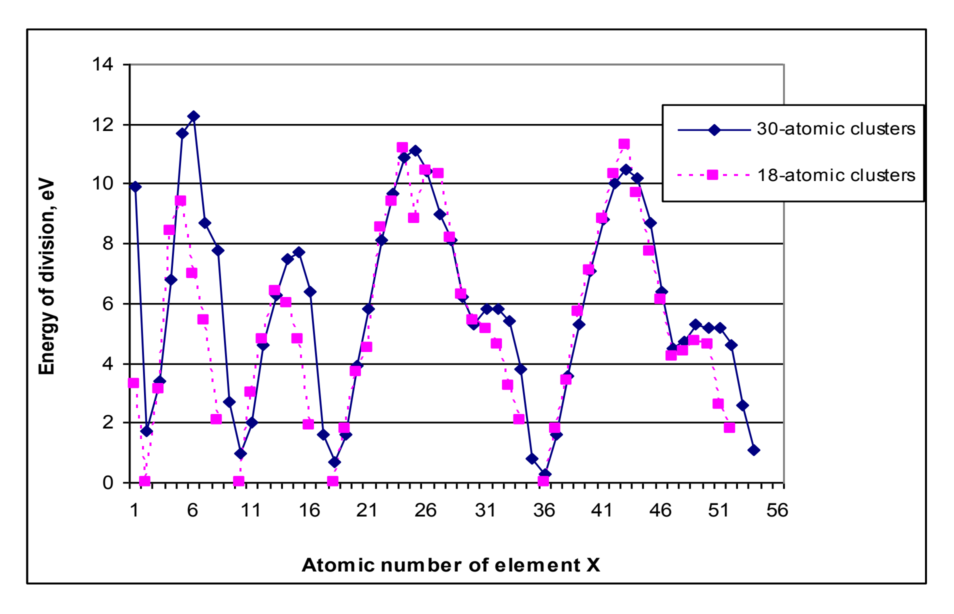


Рис. 5. Зависимость энергии распада E_d многоатомных кластеров от атомного номера элемента X

Полученные результаты могут служить теоретической базой для прогнозирования прочностных свойств стали с различным составом легирующих и примесных элементов.

Формирование пленки фрикционного переноса. Что касается антифрикционных материалов, то с позиций структурной самоорганизации, которая в случае металлополимерной трибосистемы проявляется в образовании полимерной пленки фрикционного переноса (ПФП) из продуктов износа, изучен механизм ее образования. Нашими исследованиями показано, что основой кинетического условия самоорганизации является согласованность скоростей образования пленки переноса и ее разрушения.

Так, ПТФЭ и ПЭНД при трении с металлом имеют низкий коэффициент трения за счет способности формировать на контртеле высокоориентированную пленку переноса, но за счет слабой адгезии к металлу пленка и в целом

полимерный образец интенсивно изнашиваются. Другие полимеры (ПКА, ЭД-20), наоборот, обладают достаточно сильной адгезией к металлу, но не образуют ориентированной пленки, обеспечивающей малый коэффициент трения.

Для повышения износостойкости пленки фрикционного переноса весьма перспективным является исследование механизма ее формирования на металлическом контртеле. При этом конечным продуктом является создание композита с управляемыми фрикционными характеристиками путем реализации последовательного разделения компонентов смесей полимера. С одной стороны, должна быть обеспечена адгезионная прочность пленки фрикционного переноса, а с другой — формирование тонкой высокоориентированной пленки, обеспечивающей низкий коэффициент трения.

Для исследования кинетики формирования пленки фрикционного переноса (ПФП) были выбраны композиты: фенилон, капрон, ЭД-20 с добавками ПТФЭ и ПЭ, которые подвергались испытанию на торцевой машине трения с металлической пластиной (Сталь 45) при нагрузке P = 2 МПа и скорости υ = 0,5 м/с.

При исследовании ПФП с помощью рентгеноэлектронной спектроскопии полученные спектры позволили изучить зависимость интенсивности рентгеноэлектронных линий по углероду (C1S), фтору (F1S), кислороду (O1S) от времени фрикционного контактирования. Исходя из анализа зависимости интенсивности этих линий можно выделить следующие этапы формирования пленки фрикционного переноса. Первый этап охватывает промежуток времени до 1 минуты для капрона, 1,5 минуты для ЭД-20 и 2 минуты для фенилона от начала эксперимента. В этот период поверхностный слой ПФП формируется в основном за счет продуктов переноса связующего. Это следует из увеличения интенсивности рентгеноэлектронных линий C1S и O1S, характерных для связующего, и, одновременно, уменьшения интенсивности линий F1S и C1S, относящихся к ПТФЭ и ПЭ. Второй этап относится к периоду времени от 1 до 6 минут для капрона, от 1 до 15 минут для фенилона и от 1 до 20 минут для ЭД-20. В этот период содержание продуктов фрикционного переноса ПТФЭ или ПЭ на поверхности металлического контртела увеличивается, а ПФП связующего одновременно уменьшается. Третий этап охватывает интервал времени от 10 до 40 минут для капрона, от 20 до 50 минут для фенилона и от 30 до 60 минут для ЭД-20. В пределах этого промежутка времени количество продуктов фрикционного переноса ПТФЭ или ПЭ уменьшается, а связующего увеличивается. Последующие трехпериодные стадии формирования пленок переноса имеют такой же характер образования, но интервал второго периода — образование пленки ПТФЭ или ПЭ для всех связующих значительно дольше (до 60 минут).

Заключение. Расчеты тепловой задачи показывают, что максимальное значение температуры в стальном образце металлополимерного сопряжения достигается не на поверхности, а в подповерхностном слое. Это влияет на диффузионные процессы в металлополимерной трибосистеме. Показано, что сегрегированные атомы могут, как ослаблять, так и упрочнять границы зерен. Исследован механизм образования пленки фрикционного переноса и показано, что она является основой кинетического условия самоорганизации.

Библиографический список

1. Де Брейн, Н. Г. Асимптотические методы в анализе / Н. Г. де Брейн. — Москва : ИЛ, 1961. — 247 С.

2. Вишик, М. Н., Асимптотическое поведение решений линейных дифференциальных уравнений с большими или быстроменяющимися коэффициентами и граничными условиями / М. Н. Вишик М. Н., Л. А. Люстерник // Успехи математических наук. — 1960. — Т. 15. — № 4. — С. 27–95.

3. Ломов, С. А. Введение в общую теорию сингулярных возмущений / С. А. Ломов. — Москва : Наука, 1981. — 399 с.

4. Колесников, В. И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В. И. Колесников. — Москва : Наука, 2003. — 279 с.

5. Совместимость химических элементов на границах зерен в стали и ее влияние на износостойкость стали / В. И. Колесников [и др.] // Трение и износ. — 2015. — Т. 36. — № 1. — С. 1–8.

6. Взаимодействие атомов примесных и легирующих элементов с поверхностью зерен в стали / В. И. Колесников [и др.] // Вестник Южного научного центра РАН. — 2012. — Т. 8. — № 4. — С. 27–33.

7. Разработка гибридных наполнителей для антифрикционных композиционных материалов / В. И. Колесников [и др.] // Вестник РГУПС. — 2014. — № 4. — С. 14–19.

8. Исследование процессов трения и износа с помощью методов рентгеноэлектронной, оже-электронной спектроскопии и квантовой химии / В. И. Колесников [и др.] // Вестник Южного научного центра РАН. — 2013. — Т. 9, юбил. вып. — С. 29–36.

9. Te Velde G., Bickelhaupt F.M., van Gisbergen S. J. A., Fonseca Guerra C., Baerends E. J., Snijders J.G., Ziegler T. Chemistry with ADF // J. Comput. Chem., 2001, vol. 22, pp. 931—967.

10. Seah, M. P. Adsorption-induced interface decohesion // Acta Metallurgica, 1980, vol. 28, pp. 955–962.

11. Mosey, N. J. Atomistic Modeling of Friction / N. Y. Mosey, M. H. Műser, K. B. Lipkowitz, T. R. Cundari // Reviews in Computational Chemistry, 2007, vol. 25, 67–124 pp.

References

1. De Bruijn, N.G. Asimptoticheskiye metody v analize. [Asymptotic methods in analysis.] Moscow: IL, 1961, 247 p. (in Russian).

2. Vishick, M.N., Lyusternick L.A. Asimptoticheskoye povedeniye resheniy lineynykh differentsial'nykh uravneniy s bol'shimi ili bystromenyayushchimisya koeffitsiyentami i granichnymi usloviyami. [The asymptotic behavior of solutions of linear differential equations with large or quickly changing coefficients and boundary conditions.] Russian Mathematical Surveys, 1960, vol. 15, no. 4, pp. 27-95 (in Russian).

3. Lomov, S.A. Vvedeniye v obshchuyu teoriyu singulyarnykh vozmushcheniy. [Introduction to the general theory of singular perturbations.] Moscow: Nauka, 1981, 399 p. (in Russian).

4. Kolesnikov, V.I. Teplofizicheskiye protsessy v metallopolimernykh tribosistemakh. [Thermal and physical processes in the metal and polymeric tribosystems.] Moscow: Nauka, 2003, 279 p. (in Russian).

5. Kolesnikov, V.I., Migal, Yu.F., Kolesnikov I.V., Novikov, E.S. Sovmestimost' khimicheskikh elementov na granitsakh zeren v stali i yeye vliyaniye na iznosostoykost' stali. [Compatibility of chemical elements on grain boundaries in steel and its influence on wear resistance of steel.] Journal of Friction and Wear, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 1-8 (in Russian).

6. Kolesnikov V.I., Migal Yu.F., Doronkin V.N., Novikov E.S., Kolesnikov I.V. Vzaimodeystviye atomov primesnykh i legiruyushchikh elementov s poverkhnost'yu zeren v stali. [Interaction of atoms of impurity and alloying elements with the steel grain surface.] Vestnik SSC RAS, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 27-33 (in Russian).

7. Kolesnikov, V.I., Migal, Yu.F., Kolesnikov, I.V., Myasnikova, N.A. Razrabotka gibridnykh napolniteley dlya antifriktsionnykh kompozitsionnykh materialov. [Development of hybrid filler for antifrictional composite materials.] Vestnik RGUPS, 2014, no. 4, pp. 14-19 (in Russian).

8. Kolesnikov, V.I., Kozakov, A.T., Migal, Yu.F., Kolesnikov, I.V. Issledovanie protsessov treniya i iznosa s pomoshch'yu metodov rentgenoelektronnoy, ozhe-elektronnoy spektroskopii i kvantovoy khimii [Study of friction and wear by X-Ray Electron and Auger-electron spectroscopy and quantum chemistry.] Vestnik SSC RAS. Anniversary iss., 2013, vol. 9, pp. 29-36 (in Russian).

9. Te Velde, G., Bickelhaupt, F.M., van Gisbergen, S.J.A., Fonseca Guerra, C., Baerends, E.J., Snijders, J.G., Ziegler, T. Chemistry with ADF. Journal of Computational Chemistry, 2001, vol. 22, pp. 931–967.

10. Seah, M.P. Adsorption-induced interface decohesion. Acta Metallurgica, 1980, vol. 28, pp. 955–962.

11. Mosey, N.J., Műser, M.H., Lipkowitz, K.B., Cundari, T.R. Atomistic Modeling of Friction. Reviews in Computational Chemistry, 2007, vol. 25, pp. 67–124.

Поступила в редакцию 10.11.2015
Сдана в редакцию 10.11.2015
Запланирована в номер 11.11.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.891 DOI 10.12737/16067

Влияние природы органической компоненты на триботехнические свойства системы «бронза-водный раствор карбоновой кислоты-сталь» *

В. Э. Бурлакова[1], А. А. Новикова[2], А. А. Калиниченко[3], Е. Г. Дроган[4] **

[1,2,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[3] Южный Региональный Центр судебной экспертизы Министерства юстиции России (ФБУ ЮРЦСЭ МЮ), г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of organic component nature on tribological properties of “bronze-aqueous solution of carboxylic acid-steel” system***

V. E. Burlakova[1], A. A. Novikova[2], A. A. Kalinichenko[3], E. G. Drogan[4]**

[1,2,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[3] Southern Regional Forensic Centre of the Ministry of Justice, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы являлось исследование влияния природы карбоновых кислот на триботехнические характеристики фрикционной системы «бронза—водный раствор карбоновых кислот—сталь». Трибологические испытания проводили на машине трения торцевого типа АЕ-5. Для определения размеров частиц продуктов износа проводили седиментационный анализ с использованием дисковой центрифуги CPS Disc Centrifuge Model DC24000. Шероховатость поверхности сервовитной пленки определяли с помощью атомно-силового микроскопа PHYWE. Обнаружено снижение коэффициента трения при увеличении концентраций уксусной и гликолевой кислот и его увеличение при повышении содержания щавелевой кислоты в составе смазочной среды. При увеличении концентрации кислоты в составе смазочной композиции, а также в ряду — щавелевая-уксусная-гликолевая кислоты, степень износа пары трения снижается. При увеличении среднего размера частиц продуктов износа в ряду гликолевая-уксусная-щавелевая кислоты увеличивается коэффициент трения. Сервовитная пленка, формирующаяся в водно-гликолевой среде на поверхности стального диска, содержит в своем составе кислород. Процентное содержание кислорода в пленке зависит от степени диспергирования наноструктурированной системы.

Ключевые слова: коэффициент трения, смазочная среда, карбоновые кислоты, сервовитная пленка, седиментационный анализ, атомно-силовая микроскопия.

The work objective is to study the effect of the alkanoic acids nature on the tribotechnical characteristics of the “bronze—aqueous solution of carboxylic acids—steel” friction system. The tribological tests are carried out on the end-type friction machine AE-5. The sedimentation analysis using the disc centrifuge CPS Disc Centrifuge Model DC24000 is carried out to determine the wear particle size. The surface roughness of the servovite film is determined with the aid of the atomic-force microscope PHYWE. The friction factor fall with increasing the strength of the acetic and glycolic acids, and its growth with the increase of the oxalic acid content in the lubricating medium is observed. When the acid concentration in the lubricant composition and in the oxalic-acetic-glycolic acid series is increasing, the wear factor of the friction couple decreases. With increase in the mean wear particle size in the glycolic-acetic-oxalic acid series, the friction rate increases. The servovite film being formed in the aqueous-glycolic environment on the steel disc surface contains oxygen. The oxygen percentage in the film depends on the specific surface of the nanostructured system.

Keywords: friction rate, lubricating medium, carboxylic acids, servovite film, sedimentation analysis, atomic force microscopy.

Введение. Изучение и контроль явлений, происходящих при граничном трении на молекулярном уровне, влияние природы органической компоненты в составе смазочной композиции на структуру и механические свойства сервовитной пленки, образующейся на контактирующих поверхностях деталей машин в процессе их эксплуатации, является актуальным вопросом в плане создания инновационных смазочных материалов, обеспечивающих эффект безызносности при трении.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: vburlakova@donstu.ru, anastasianovik@mail.ru, kaa2307@gmail.com, ekaterina.drogan@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Ранее было изучено влияние природы смазочной среды на возможность реализации избирательного переноса при трении, а также возможности расширения номенклатуры соединений, использование которых в узлах трения приводит к реализации эффекта безызносности [1-2]. Представляется интересным рассмотреть взаимосвязь органических соединений, образующихся при окислении спиртов в зоне фрикционного взаимодействия. Целью настоящей работы являлось изучение взаимосвязи триботехнических характеристик пары трения бронза-сталь с природой карбоновых кислот.

Экспериментальная часть. Трибологические исследования эволюции коэффициента трения проводили на машине трения торцевого типа АЕ-5. Исследовательский комплекс состоял из рабочей части машины трения, представленной в виде ванны из текстолита, в которой расположен и жестко закреплен стальной диск. К внешней части ванны прикреплялся динамометр марки PHYWE Cobra. Узел трения представлял собой стальной образец и три пальца из бронзы, расположенных по окружности под углом 120° друг относительно другу. В качестве смазочной среды выступали водные растворы щавелевой, уксусной и гликолевой кислот различной концентрации.

Размеры частиц продуктов износа определяли с помощью седиментационного анализа[1] на дисковой центрифуге марки CPS Disk Centrifuge DC24000 в водных растворах кислот. Морфологию поверхности и наноструктуру пленок исследовали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) марки PHYWE Compact.

Для установления элементного состава медной пленки использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) TESCAN MIRA 3 XMU. Определение элементов проводилось с помощью программного обеспечения «AZtec 2.1». Количественный расчет содержания элементов проводился с использованием опции нормализации элементов.

Обсуждение и результаты. Сравнительное изучение длительной эволюции коэффициента трения (μ) от времени при постоянной нагрузке пары трения бронзасталь в водных растворах карбоновых кислот показывает его снижение (рис. 1). Для оценки точности и надежности экспериментальных результатов коэффициента трения рассчитывали доверительный интервал с вероятностью 0,95 (коэффициент Стьюдента равен 3,18244) (рис. 1).

Вид зависимости коэффициента трения от времени является характерным для систем, реализующих избирательный перенос при трении. При этом на поверхности фрикционного взаимодействия образуется сервовитная пленка, обеспечивающая некоторое снижение контактных напряжений в ряду кислот щавелевая-уксусная-гликолевая.

Анализ влияния концентрации карбоновой кислоты в составе смазочной среды на коэффициент трения в паре трения бронза-сталь обнаруживает, что увеличение концентрации уксусной и гликолевой кислот приводит к его снижению, в то время, как увеличение содержания щавелевой кислоты способствует, наоборот, увеличению коэффициента трения (рис. 1).

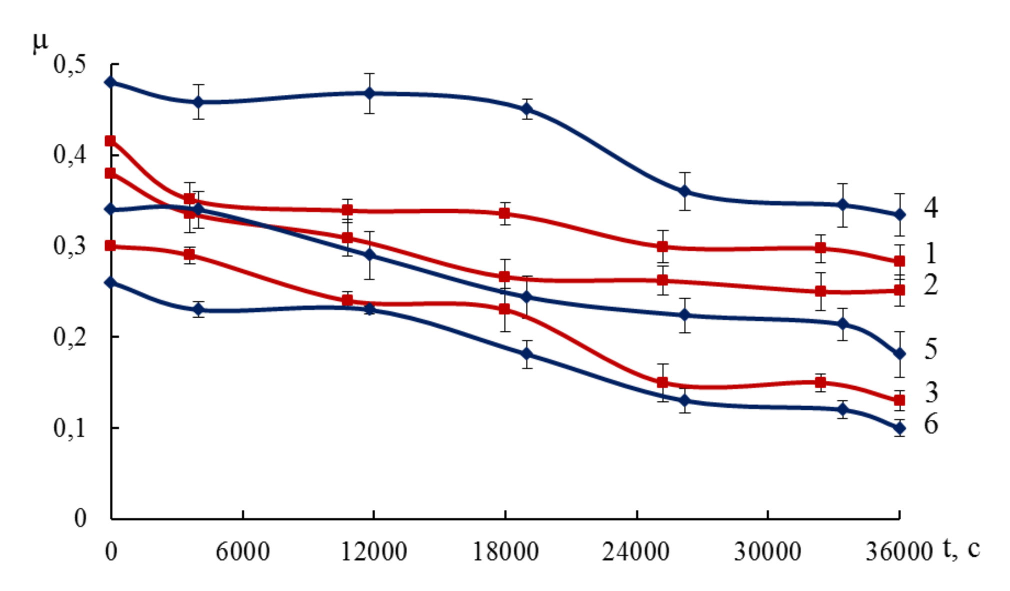


Рис. 1. Эволюция коэффициента трения (μ) от времени (t) в системе «бронза-водный раствор кислоты-сталь» с молярной концентрацией кислот: 1-3—0,1 моль/л; 4-6—0,2 моль/л: 1, 4—щавелевая кислота; 2, 5—уксусная кислота; 3, 6 — гликолевая кислота

Учитывая константу диссоциации щавелевой кислоты, а также возможность ее декарбоксилирования в муравьиную (при трении в которой коэффициент трения пары бронза-сталь значительно выше), при увеличении темпера-

[1] Седиментационный анализ выполнен на оборудовании РЦКП, НОЦ «Материалы» ДГТУ

туры в зоне фрикционного контакта, становится логичным увеличение коэффициента трения в ряду кислот гликолевая – уксусная – щавелевая (табл.1).

Результаты седиментационного анализа свидетельствуют о некотором уменьшении размера частиц износа при увеличении концентрации уксусной кислоты. В растворах гликолевой и щавелевой кислот при увеличении молярной концентрации органической компоненты размер частиц износа значительно увеличивается. Это может быть связано с растворением мелких частиц, комплексообразованием, вследствие чего в продуктах износа остаются, преимущественно, частицы большого размера.

Сравнение степени износа пары трения при увеличении концентрации каждой из кислот показывает, что в растворе щавелевой кислоты, по сравнению с уксусной и гликолевой, количество частиц износа уменьшается, по-видимому, вследствие растворения мелких частиц.

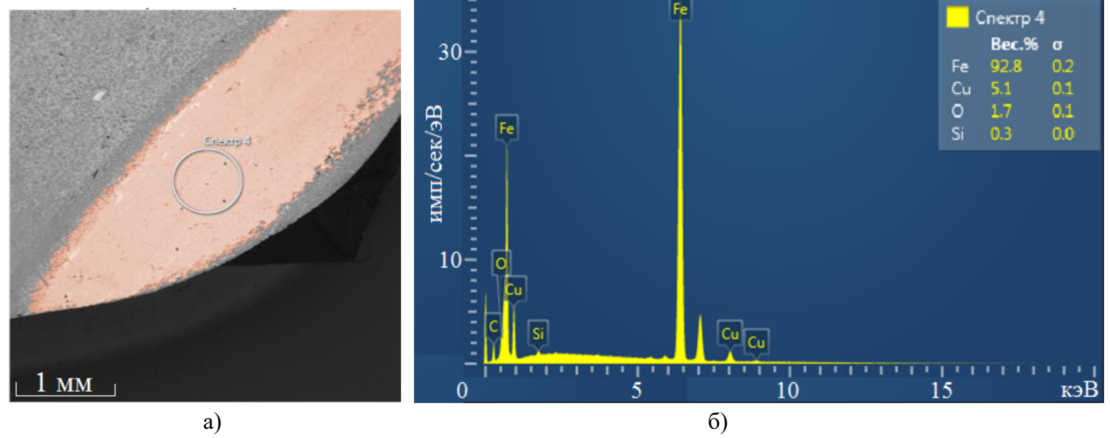
Рассматривая влияние функциональных групп на триботехнические возможности карбоновых кислот, следует отметить, что введение второй функциональной группы в углеводородный радикал молекулы кислоты (гликолевая и щавелевая) должно приводить к увеличению центров адсорбционной активности и снижению коэффициента трения (табл. 1). Однако коэффициент трения в ряду кислот гликолевая-уксусная-щавелевая, как следует из экспериментальных данных, увеличивается. Это может быть связано, в том числе, и с уменьшением вязкости смазочной среды при увеличении размера частиц износа (табл. 1) [3].

Таблица 1

Взаимосвязь коэффициента трения и размера частиц износа

Кислота, тривиальное название	Химическая формула кислоты	Константа диссоциации	Количество Частиц продуктов износа в смазке	Средний размер частиц продуктов износа в смазке, нм	Коэффициент трения
Щавелевая	HOOC-COOH	$380 \cdot 10^{-4}$	$12{,}1 \cdot 10^{9}$	326	0,28
Уксусная	H_3C-COOH	$18{,}6 \cdot 10^{-4}$	$22{,}9 \cdot 10^{9}$	220	0,25
Гликолевая	HO-CH_2-COOH	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$	$18{,}4 \cdot 10^{9}$	150	0,13

Исследование с использованием СЭМ топографии поверхности медной пленки, образующейся в результате фрикционного взаимодействия в водно-гликолевой среде, показывает, что на поверхности стального образца формируется медная пленка в нанометровом диапазоне толщин, что не может препятствовать проникновению электронных лучей в нижние слои материала образца (рис. 2а) [4]. Вследствие этого на EDS-спектре, помимо пиков меди и кислорода, обнаруживаются пики железа верхних слоев подложки (стального диска) (рис. 2б).



а) б)

Рис. 2. Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности сервовитной пленки, полученной при трении пары бронза-сталь в водном растворе гликолевой кислоты:
а — изображение сервовитной пленки на поверхности стального образца; б — EDS-спектр

Незначительное содержание кислорода, найденное в составе медной пленки, по-видимому, входящее в состав Cu_2O, является следствием его хемосорбции, степень которой, а, следовательно, и состав пленки, зависят от степени диспергирования наноструктурированной системы меди на поверхности стального диска (рис.2б) [5]. Ранее обнаруженные методом РФЭС нестабильные частицы Cu^+ ($E_{св}2p$=932,7 эВ), а также Cu^0, подтверждают полученные результаты о преимущественном содержании наночастиц меди Cu^0 в составе сервовитной пленки [6]. Такая пленка имеет низкую твердость (по сравнению с твердостью оксидов меди), что приводит к снижению трения. Низкий модуль упругости увеличивает упругие деформации контактной поверхности и уменьшает износ [6, 7]. При этом необходимо отметить, что содержание кислорода в составе медной пленки, полученной при трении в водных растворах щавелевой и уксусной кислот, значительно выше. Следствием этого является увеличение износа (табл. 1).

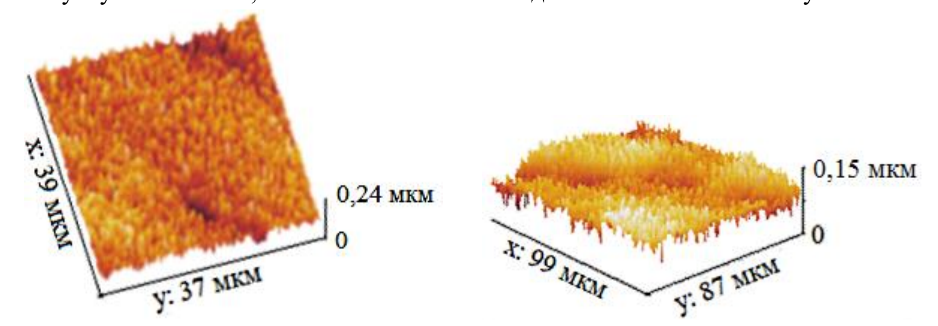


Рис. 3. 3D — визуализация поверхности сервовитной пленки

Анализ топографии поверхности, выполненной с использованием СЭМ, подтверждает ранее полученные в [8] результаты о последовательном послойном переносе меди на поверхность стального диска (рис. 2). Как видно из рис. 3, образующаяся при трении медная пленка, характеризуется наличием определенного числа глубоких проколов и обладает достаточной пористостью, что является особенностью избирательного переноса [9-11].

Сопоставление топографии поверхности сервовитной пленки, полученной с использованием АСМ, показывает, что пленка имеет глобулярную структуру с размахом по высоте более 25 нм (рис. 4) [12].

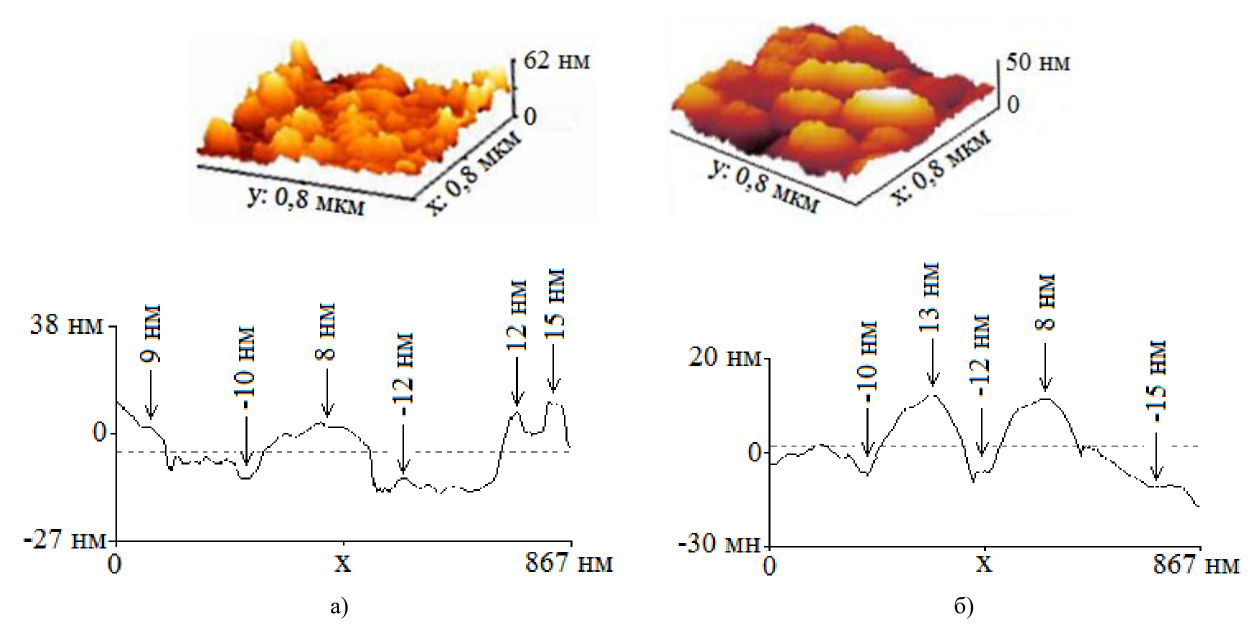


Рис. 4. Результаты атомно-силовой микроскопии: 3D — визуализация поверхности сервовитной пленки, формирующейся при трении бронзы по стали в водных растворах кислот: а — щавелевая; б — гликолевая

При трении в водно-гликолевых средах, по сравнению с водными растворами щавелевой и уксусной кислот, расстояние между кластерами меди на поверхности стального образца уменьшается, плотность покрытия поверхности сервовитной пленкой увеличивается, уменьшается шероховатость, происходит выглаживание микронеровностей, что способствует снижению трения между контактными поверхностями (рис. 4).

Выводы. Таким образом, при трении бронзы по стали в водных растворах карбоновых кислот обнаружена зависимость коэффициента трения от концентрации органической компоненты и ее природы в составе смазочной среды. Выявлено снижение коэффициента трения в ряду кислот щавелевая- уксусная-гликолевая. Результаты АСМ и

СЭМ подтверждают выводы о влиянии структуры поверхности пленки на триботехнические характеристики трибопары. Показано, что увеличение содержания кислорода в составе сервовитной пленки снижает ее триботехнические возможности.

Библиографический список

1. Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) / Д. Н. Гаркунов. — Москва : Издательство МСХА, 2001 — 616 с.

2. Косогова, Ю. П. Нанотрибоэлектрохимические технологии при реализации эффекта безызносности в водно-спиртовых средах: автореф. канд. техн. наук/ Ю. П. Косогова. — Ростов-на-дону : Издательский центр ДГТУ, 2009. — 23 с.

3. Wu, Y. Y. Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives / Y. Y. Wu, W. C. Tsui, T. C. Liu // Wear. — 2007. — Vol. 262. — P. 819–825

4. Padgurskas, J. Tribological running-in investigation and surface analysis of copper coats made by electro-impulsive spraying / J. Padgurskas, R. Rukuiža, V. Jankauskas, A. Andriušis, A. Žunda // Surface & Coatings Technology. — 2011. — Vol. 205. — P. 3328–3333.

5. Стадниченко, А. И. Исследование наноструктурированных пленок оксида меди CuO методами РФЭС, УФЭС и СТМ / А. И. Стадниченко, А. М. Сорокин, А. И. Боронин // Журнал структурной химии. — 2008. — Т. 49, № 2. — С. 353–359

6. Yu, H. Tribological properties and lubricating mechanisms of Cu nanoparticles in lubricant / H. Yu, Y. Xu, P. Shi, X. Wang, Q. Liu // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. — 2006. — Vol. 18. — P. 636–641.

7. Zhang, Y. S. Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper / Y. S. Zhang, Z. Han, K. Wang, K. Lu // Wear. — 2006. — Vol. 260. — P. 942–948

8. Бурлакова, В. Э. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности / В. Э. Бурлакова. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2005. — 209с.

9. Стогний, А. И. Применение АСМ для анализа морфологии поверхности ультратонких металлических пленок / А. И. Стогний, Н. Н. Новицкий // БелСЗМ-5, г. Минск, 7-8 окт. 2002. — С. 109–111.

10. Achanta, S. Friction mechanisms at the micro-scale / S. Achanta, T. Liskiewiez, D. Drees // Tribology International — 2009. — Vol. 42. — P. 1792–1799.

11. Kah-Yoong Chan. Atomic force microscopy (AFM) and X-ray diffraction (XRD) investigations of copper thin films prepared by dc magnetron sputtering technique / Chan Kah-Yoong, Teo Bee-San // Microelectronics Journal. — 2006. — Vol. 37. — P. 1064–1071.

12. Акимов, В. В. Применение сканирующей зондовой микроскопии для исследования ультрадисперсных минеральных систем / В. В. Акимов, И. Н Герасимов, С. В. Липко // Вестник отделения наук о Земле РАН. — 2006, №1(24). — С. 5–9.

References

1. Garkunov, D.N. Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost') [Triboengineering (wear and wearlessness).] Moscow: Izdatel'stvo MSKhA, 2001, 616 p. (in Russian).

2. Kosogova, Y.P. Nanotriboelektrokhimicheskie tekhnologii pri realizatsii effekta bezyznosnosti v vodno-spirtovykh sredakh: avtoref. kand. tekhn. nauk. [Nano Tribo Electrochemical technologies under the implementation of wearlessness effect in aqueous-alcoholic media: Cand.Sci. (Eng.) diss., author's abstract.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2009, 23 p. (in Russian).

3. Wu, Y.Y., Tsui, W.C., Liu, T C. Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives. Wear, 2007, vol. 262, iss. 7-8, pp. 819–825.

4. Padgurskas, J., Rukuiža, R., Jankauskas, V., Andriušis, A., Žunda, A. Tribological running-in investigation and surface analysis of copper coats made by electro-impulsive spraying. Surface & Coatings Technology, 2011, vol. 205, iss. 10, pp. 3328–3333.

5. Stadnichenko, A.I., Sorokin, A.M., Boronin, A.I. Issledovanie nanostrukturirovannykh plenok oksida medi CuO metodami RFES, UFES i STM. [XPS, UPS and STM study of the nanostructured CuO films.] Journal of structural chemistry, 2008, vol. 49, no. 2, pp. 353–359 (in Russian).

6. Yu, H., Xu, Y., Shi, P., Wang, X., Liu, Q. Tribological properties and lubricating mechanisms of Cu nanoparticles in lubricant. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, vol. 18, iss. 3, pp. 636–641.

7. Zhang, Y.S., Han, Z., Wang, K., Lu, K. Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper. Wear, 2006, vol. 260, iss. 9-10, pp. 942–948.

8. Burlakova, V.E. Triboelektrokhimiya effekta bezyznosnosti. [Tribo Electrochemistry of wearlessness effect.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2005, 209 p. (in Russian).

9. Stogniy, A.I., Novitskiy, N.N. Primenenie ASM dlya analiza morfologii poverkhnosti ul'tratonkikh metallicheskikh plenok. [Application of AFM to analyze the surface morphology of the ultra thin metal films.] Minsk: Bel. Seminar on Scanning Probe Microscopy, 2002, 7-8 Oct., pp. 109–111 (in Russian).

10. Achanta, S., Liskiewiez, T., Drees, D. Friction mechanisms at the micro-scale. Tribology International, 2009, vol. 42, iss. 11-12, pp. 1792–1799.

11. Kah-Yoong Chan, Teo Bee-San. Atomic force microscopy (AFM) and X-ray diffraction (XRD) investigations of copper thin films prepared by dc magnetron sputtering technique. Microelectronics Journal, 2006, vol. 37, iss. 10, pp. 1064–1071.

12. Akimov, V.V., Gerasimov, I.N., Lipko, S.V. Primenenie skaniruyushchey zondovoy mikroskopii dlya issledovaniya ul'tradispersnykh mineral'nykh sistem. [Application of scanning probe microscopy to study ultradisperse mineral systems.] Vestnik otdeleniya nauk o Zemle RAN, 2006, no. 1(24), pp. 5–9 (in Russian).

Поступила в редакцию 21.09.2015
Сдана в редакцию 21.09.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-133 DOI 10.12737/16072

Структурный синтез перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов*

А. А. Приходько[1], А. И. Смелягин[2]**
[1,2] Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

Structural synthesis of stirred tanks with swinging motion of impellers***

A. A. Prikhodko[1], A. I. Smelyagin[2]**
[1,2] Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

Целью данной работы является создание перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов, так как они отличаются от других современных аппаратов более высокой интенсивностью и равномерностью перемешивания. Синтез структурных схем исполнительных механизмов проведен с помощью структурных математических моделей. В результате получены рычажные и зубчатые механизмы с одним и двумя независимыми замкнутыми контурами. Шарнирный четырехзвенник и планетарный механизм с эллиптическими зубчатыми колесами при соответствующем выборе размеров звеньев преобразуют вращательное движение в возвратно-вращательное. Применение зубчатой передачи и передачи с гибкой связью позволяет создать множество структурных схем, которые отличаются количеством рабочих органов и их расположением. На основе полученных структурных схем могут быть разработаны и спроектированы высокоэффективные перемешивающие устройства для химических, нефтехимических, пищевых производств. Преимуществом предлагаемых механизмов является то, что они образованы из известных, высоконадежных и хорошо отработанных устройств. Также рабочие органы аппаратов хорошо конфигурируются по всему объему реактора, создавая рациональный тепломассообмен.

Ключевые слова: виброперемешивание, возвратно-вращательные перемешивающие устройства, структурный синтез, структурная математическая модель, звено, кинематическая пара, исполнительный механизм.

The work objective is to provide stirred tanks with a swinging movement of impellers, as they differ from the other modern devices in higher intensity and uniform mixing. Synthesis of the actuator diagrams is carried out by the structural mathematical models. As a result, the leverage and gear units with one or two independent closed loop circuits are obtained. Four-bar linkage and a planetary mechanism with elliptical gearwheels under the appropriate dimensioning of the links are converting rotary mode into reciprocating rotation. The application of the gear and continuous drive allows creating a set of structural diagrams which differ in the number of impellers and their location. On the basis of the developed structural schemes, high-efficient stirrers for the chemical, petrochemical and food industries can be worked out and designed. The advantage of the proposed mechanisms is that they are developed from the known, well-established, and highly reliable devices. Besides, the impellers are well configured throughout the total reactor volume creating a rational heat-mass exchange.

Keywords: vibromixing, rotationally reciprocating stirred tanks, structural synthesis, structural mathematical model, link, kinematic pair, actuator.

Введение. Перемешивание является одним из наиболее распространенных процессов химической технологии и широко применяется в различных отраслях промышленности для интенсификации тепломассообмена [1]. Современные

* Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследовательский центр машиностроения, материаловедения, строительства и транспортных систем».
** E-mail: sannic92@gmail.com, asmelyagin@yandex.ru
*** The research is done using equipment of the Common Use Centre "Centre of studies in mechanical engineering, material science, construction, and transportation systems."

перемешивающие устройства можно разделить на три типа: классические вращательные аппараты, аппараты со сложным пространственным движением рабочих органов, вибрационные перемешивающие устройства.

Следует отметить, что классические вращательные перемешивающие устройства (наиболее распространенные и исследованные [2, 3]) не всегда позволяют эффективно достичь требуемого тепломассообмена.

Более современные аппараты с планетарным [4, 5] и сложным пространственным движением рабочих органов [6, 7] позволяют обеспечить высокую интенсивность тепломассообменных процессов, однако такие устройства не получили широкого распространения в промышленности. Это обусловлено прежде всего сложностью их конструкции, что приводит к затруднениям как на стадиях расчета и проектирования, так и на стадиях изготовления и эксплуатации.

В последнее время активно исследуются вибрационные перемешивающие устройства (ВПУ) [8–10]. Подбор оптимальной амплитуды и частоты колебаний рабочих органов позволяет сократить время протекания многих процессов в 1,5–2 раза, а удельные капитальные и эксплуатационные затраты — в 1,2–1,8 раза [11]. К недостаткам таких устройств следует отнести значительные вертикальные вибрации, которые передаются в окружающую среду и усложняют работу оператора, а также наличие поступательно движущегося штока, который сложно уплотнять, в результате чего ВПУ ненадежны и не могут использоваться в реакторах, работающих под давлением и с агрессивными средами. Поэтому актуальной задачей является создание перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов, которые:

— характеризуются отсутствием вертикальных вибраций;

— состоят из высоконадежных и отлаженных механизмов.

Для того чтобы создать возвратно-вращательные перемешивающие устройства, необходимо провести синтез исполнительных механизмов, которые будут преобразовывать вращательное движение в возвратно-вращательное.

Синтез проведем с использованием структурной математической модели механизмов с замкнутыми кинематическими цепями, которая, в соответствии с [12], имеет вид:

$$\begin{cases} p = \dfrac{1}{2}\left(\sum\limits_{t=T-j}^{2} t n_t + S\right); \\ n = \sum\limits_{t=T-j}^{T} n_t; \\ W = \sum\limits_{i=1}^{\Pi-1} i p_i - k\Pi; \\ k = p - n; \\ p = \sum\limits_{i=1}^{\Pi-1} p_i; \\ T \le k+1, \end{cases} \tag{1}$$

где p — общее число кинематических пар; p_i — число кинематических пар i-й подвижности; T — количество вершин базового звена; t — число вершин звеньев; n — общее число подвижных звеньев; n_t — число подвижных звеньев с t вершинами; k — число независимых замкнутых контуров; Π — подвижность пространства, в котором синтезируется механизм; S — число присоединений к стойкам; i — целочисленный индекс; j — целочисленный индекс.

Структурный синтез исполнительных механизмов с одним рабочим органом. Чтобы устройство получилось надежным и компактным, ограничимся синтезом одноподвижных ($W = 1$) механизмов с одним ($k = 1$) и двумя ($k = 2$) независимыми замкнутыми контурами.

Синтез механизма с одним независимым замкнутым контуром проведем при следующих условиях. Механизм должен существовать в трехподвижном пространстве ($\Pi = 3$), иметь двухвершинное базовое звено ($T = 2$) и только одноподвижные вращательные кинематические пары ($p = p_1$). Структурная математическая модель (1) после подстановки в нее условий синтеза примет вид:

$$\begin{cases} p = \dfrac{1}{2}(2n_2 + S); \\ n = n_2; \\ 1 = p_1 - 3; \\ 1 = p - n; \\ p = p_1; \\ 2 \le 2. \end{cases} \tag{2}$$

Решение системы (2) надо искать при условии, что в синтезируемом механизме число звеньев, кинематических пар и присоединений к стойке должно быть целым и положительным. Корнями модели (2) являются следующие значения: $p = p_1 = 4$; $n = 3$; $S = 2$.

Из найденного решения следует, что синтезируемый механизм должен иметь: четыре одноподвижные вращательные кинематические пары ($p_1 = 4$); три подвижных звена ($n = 3$); два присоединения к стойке ($S = 2$). Найденному решению и условиям синтеза соответствует только один механизм — шарнирный четырехзвенник (рис. 1).

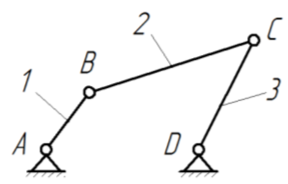


Рис. 1. Шарнирный четырехзвенник: 1 — кривошип, 2 — шатун, 3 — коромысло; *A, B, C, D* — кинематические пары

Итак, в качестве исполнительного механизма перемешивающего устройства может применяться шарнирный четырехзвенник, который при соответствующем выборе длин звеньев преобразует вращательное движение кривошипа 1 в возвратно-вращательное движение коромысла 3.

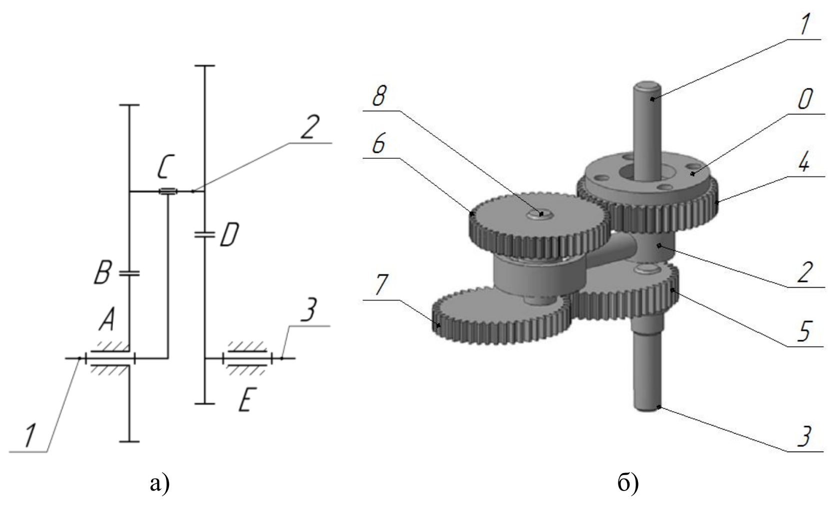
Синтез механизма с двумя независимыми замкнутыми контурами проведем при следующих условиях. Механизм должен существовать в трехподвижном пространстве ($П = 3$), иметь трехвершинное базовое звено ($T = 3$), одно- (p_1) и двухподвижные (p_2) вращательные кинематические пары. Структурная математическая модель (1) после подстановки в нее условий синтеза примет вид:

$$\begin{cases} p = \frac{1}{2}(3n_3 + 2n_2 + S); \\ n = n_3 + n_2; \\ 1 = 2p_2 + p_1 - 2 \cdot 3; \\ 2 = p - n; \\ p = p_1 + p_2; \\ 3 \le 3. \end{cases} \quad (3)$$

Целочисленными корнями модели (3) являются следующие значения:

а) $p_1 = 1$, $p_2 = 3$, $p = 4$, $n_3 = 1$, $n_2 = 1$, $n = 2$, $S = 3$;
б) $p_1 = 3$, $p_2 = 2$, $p = 5$, $n_3 = 1$, $n_2 = 2$, $n = 3$, $S = 3$;
в) $p_1 = 5$, $p_2 = 1$, $p = 6$, $n_3 = 1$, $n_2 = 3$, $n = 4$, $S = 3$;
г) $p_1 = 7$, $p_2 = 0$, $p = 7$, $n_3 = 1$, $n_2 = 4$, $n = 5$, $S = 3$.

Анализ полученных решений показал, что аппарат с наиболее простой конструкцией должен иметь не более двух двухподвижных кинематических пар ($p_2 \le 2$). При этом общее число кинематических пар не должно превышать пяти ($\sum p_i \le 5$). Поставленному условию отвечает решение б, которому соответствует планетарный зубчатый механизм [13] (рис. 2).



а) б)

Рис. 2. Планетарный преобразователь вращательного движения в возвратно-вращательное: структурная схема (а); конструктивное исполнение (б)

Синтезированный механизм (рис. 2, а) имеет:

— три одноподвижные (A, C, E) и две двухподвижные кинематические пары (B, D);

— одно трехвершинное звено (2) и два двухвершинных звена (1, 3);

— три присоединения к стойке.

Планетарный исполнительный механизм (рис. 2, б) состоит из: стойки 0; входного вала 1; водила 2; выходного вала 3; центрального круглого неподвижного колеса 4; эллиптического зубчатого колеса 5; круглого зубчатого колеса сателлита 6; эллиптического зубчатого колеса сателлита 7; вала, соединяющего колеса сателлита, 8.

В этом механизме зубчатые колеса 4 и 6 имеют одинаковые диаметры, а эллиптические зубчатые колеса 5 и 7 — одинаковые полуоси, причем межосевые расстояния пары цилиндрических и пары эллиптических колес равны. Возвратно-вращательное движение обеспечивается за счет переменного передаточного отношения пары эллиптических колес [13].

Структурный синтез исполнительных механизмов с несколькими рабочими органами. Синтезированные исполнительные механизмы перемешивающих устройств могут эффективно использоваться в реакторах малого объема, однако для использования в больших объемах промышленных реакторов нецелесообразны, так как наличие лишь одного рабочего органа приводит к образованию застойных зон. Поэтому проведем структурный синтез механизмов для передачи возвратно-вращательного движения нескольким рабочим органам.

Синтезируем одноподвижные механизмы ($W = 1$) с одним ($k = 1$) и двумя ($k = 2$) независимыми замкнутыми контурами.

Синтез механизма с одним независимым замкнутым контуром проведем при следующих условиях. Механизм должен существовать в трехподвижном пространстве ($\Pi = 3$), иметь двухвершинное базовое звено ($T = 2$), одно- (p_1) и двухподвижные (p_2) вращательные кинематические пары. Структурная математическая модель после подстановки в нее условий синтеза примет вид:

$$\begin{cases} p = \frac{1}{2}(2n_2 + S); \\ n = n_2; \\ 1 = 2p_2 + p_1 - 1 \cdot 3; \\ 1 = p - n; \\ p = p_1 + p_2; \\ 2 \geq 2. \end{cases} \quad (4)$$

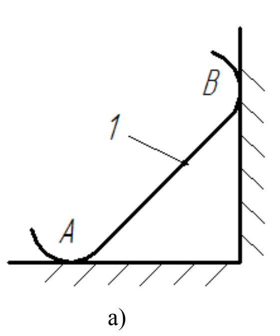
Целочисленными корнями модели (4) являются следующие значения:

а) $p_1 = 0$, $p_2 = 2$, $p = 2$, $n_2 = 1$, $n = 1$, $S = 2$;

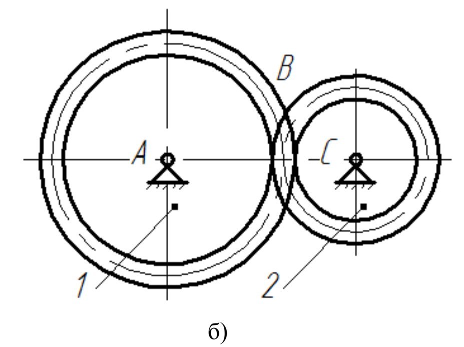
б) $p_1 = 2$, $p_2 = 1$, $p = 3$, $n_2 = 2$, $n = 2$, $S = 2$;

в) $p_1 = 4$, $p_2 = 0$, $p = 4$, $n_2 = 3$, $n = 3$, $S = 2$.

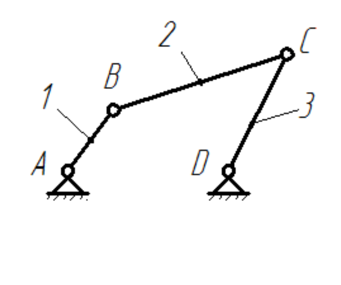
Структурные схемы механизмов, соответствующие найденным решениям, приведены на рис. 3.



а)



б)



в)

Рис. 3. Структурные схемы механизмов с одним независимым контуром: двухзвенный механизм (а), пара прямозубых колес (б), шарнирный четырехзвенник (в); 1, 2, 3 — звенья; A, B, C, D — кинематические пары

Итак, как видно из рис. 3, для передачи возвратно-вращательного движения нескольким рабочим органам может применяться только механизм соответствующий решению б — пара прямозубых колес.

Для синтеза механизма с двумя независимыми контурами примем начальные условия, сформулированные для двухконтурного преобразователя вращательного движения в возвратно-вращательное. Структурная математическая модель для этого случая примет вид (3), решением которой являются следующие значения: $p_1 = 3$, $p_2 = 2$, $p = 5$, $n_3 = 1$, $n_2 = 2$, $n = 3$, $S = 3$. Найденному решению соответствует схема, представленная на рис. 4.

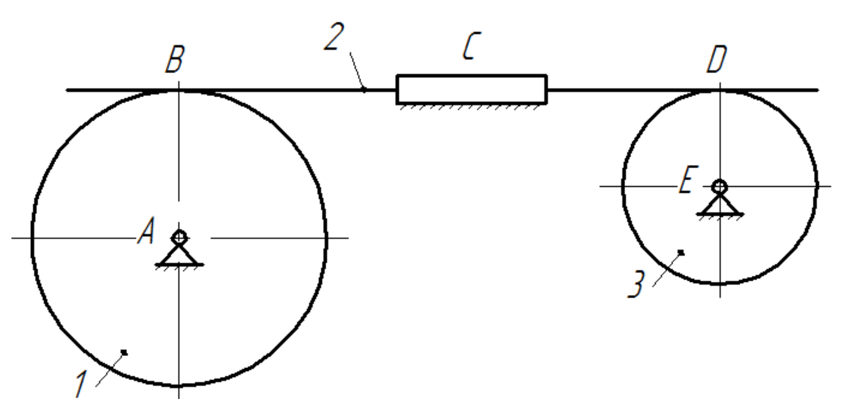
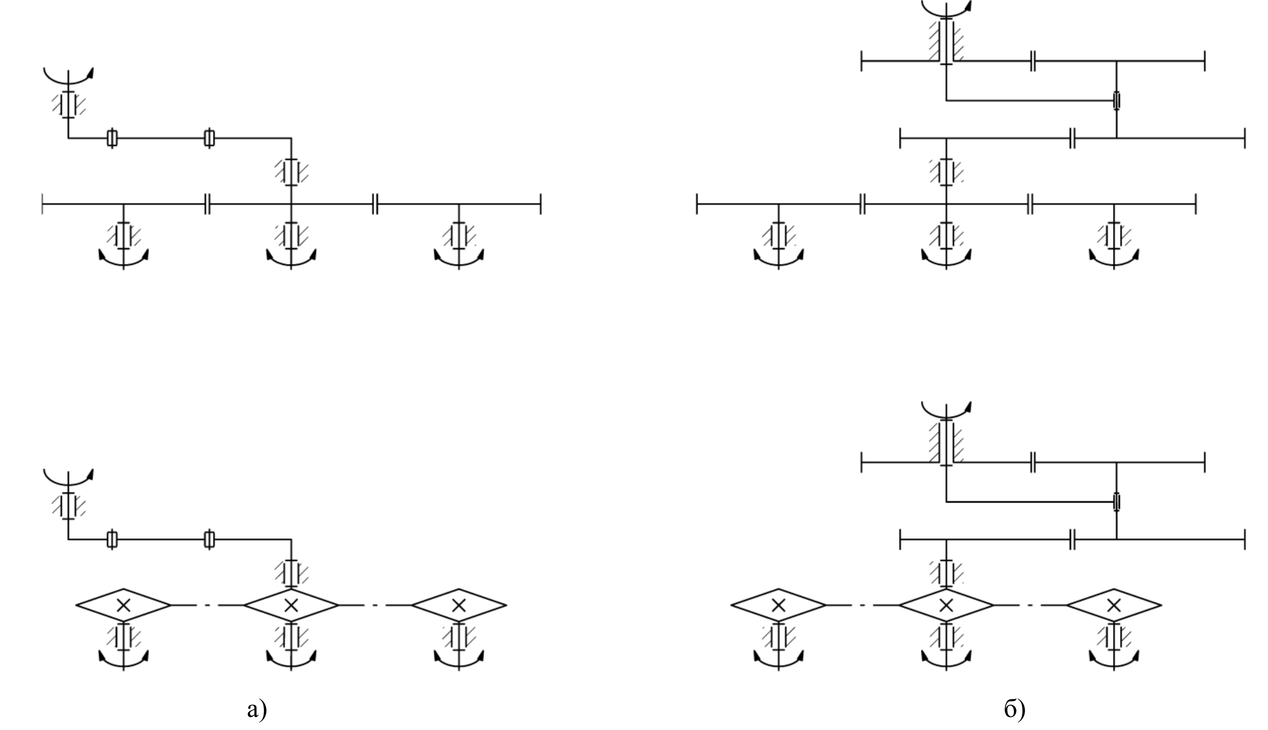


Рис. 4. Структурная схема реечной зубчатой передачи: 1, 3 — двухвершинные звенья (зубчатые колеса); 2 — трехвершинное звено (рейка); *A*, *C*, *E* — одноподвижные кинематические пары; *B*, *D* — двухподвижные кинематические пары

Однако в исполнительном механизме перемешивающего устройства неудобно использовать синтезированную реечную передачу, поэтому заменим ее ременной или цепной в соответствии с [12]. Применение гибкой связи дает возможность передавать возвратно-вращательное движение на значительные расстояния, что позволяет реализовать исполнительный механизм в больших объемах промышленных реакторов.

Чтобы получить исполнительные механизмы перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов, объединим синтезированные преобразователи вращательного движения в возвратно-вращательное и механизмы для передачи движения нескольким рабочим органам (рис. 5).



а) б)

Рис. 5. Схемы исполнительных механизмов перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов

На рис. 5 показаны варианты схем исполнительных механизмов с одноконтурным (рис. 5, а) и двухконтурным преобразователями (рис. 5, б). Изменяя количество и расположение периферийных рабочих органов, получим исполнительные механизмы для реакторов различных форм и размеров [14].

Заключение. В работе проведен структурный синтез, который позволил найти структурные схемы исполнительных механизмов перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов. Анализ рассмотренных схем показывает, что синтезированные механизмы не имеют избыточных связей и местных степеней свободы, являются достаточно простыми и технологичными, образованы из высоконадежных и хорошо отработанных устройств. Привод таких аппаратов, в отличие от планетарных мешалок, можно разместить в отдельном корпусе вне зоны реактора [14–16], что положительно повлияет на ресурс его работы. В предлагаемых перемешивающих устройствах отсутствуют вертикальные вибрации, применяются стандартные уплотнения, а для устранения застойных зон рабочие органы располагаются равномерно по всему объему реактора.

Библиографический список

1. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах: физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. — Ленинград : Химия, 1984. — 336 с.

2. Hemrajani, R.-R. Mechanically stirred vessels / R.-R. Hemrajani, G.-B. Tatterson // Handbook of industrial mixing: science and practice. — Hoboken : Wiley-Interscience, 2004. — P. 345–390.

3. Food mixing: Principles and applications / ed. P.-J. Cullen. — Singapore : Wiley-Blackwell, 2009. — 292 p.

4. Dimensional analysis for planetary mixer: mixing time and Reynolds numbers / G. Delaplace [et al.] // Chemical Engineering Science. — 2007. — Vol. 62, is. 5. — P. 1442–1447.

5. Granular flow in a planetary mixer / M.-J.-P. Hiseman [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. — 2002. — Vol. 80, is. 5. — P. 432–440.

6. Мудров, А. Г. Разработка пространственных перемешивающих устройств нового поколения, применяемых в сельском хозяйстве и промышленности : дис. … д-ра техн. наук / А. Г. Мудров. — Казань, 1999. — 493 с.

7. Устройство для перемешивания : патент 2113897 Рос. Федерация : МКИ В 28 С 5/16 / А. И. Смелягин, В. Г. Сачков, Н. А. Чусовитин ; Новосиб. гос. техн. ун-т. — № 96109653 ; заявл. 13.05.1996 ; опубл. 27.10.98, Бюл. № 18. — 1 с.

8. Смелягин, А. И. Структурный синтез и кинематический анализ простых исполнительных механизмов виброперемешивающих устройств / А. И. Смелягин, И. В. Юхневич // Омский научный вестник. — 2012. — № 3 (113). — С. 72–75.

9. Ткаченко, Р. Н. Влияние вибрационной обработки мезги винограда на химический состав виноматериалов / Р. Н. Ткаченко, В. Т. Христюк, А. И. Смелягин // Хранение и переработка сельхозсырья. — 2011. — № 10. — С. 52–55.

10. Study on vibromixing for polymer solutions / C. Ibanescu [et al.] // Iranian polymer journal. — 1998. — Vol. 7, is. 2. — P. 129–135.

11. Смелягин, А. И. Структурный и параметрический синтез исполнительных механизмов виброперемешивающих устройств / А. И. Смелягин, И. В. Юхневич // Изв. вузов. Пищевая технология. — 2013. — № 2/3. — С. 93–96.

12. Смелягин, А. И. Структура механизмов и машин / А. И. Смелягин. — Москва : Высшая школа, 2006. — 304 с.

13. Зубчатый преобразователь вращательного движения в возвратно-вращательное : патент 2528493 Рос. Федерация : МПК F 16 H 19/08 / А. И. Смелягин, И. В. Юхневич ; Кубан. гос. техн. ун-т. — № 2012135364/11 ; заявл. 16.08.2012 ; опубл. 20.09.2014, Бюл. № 26. — 8 с.

14. Перемешивающее устройство : заявка 2014150126 Рос. Федерация : МПК B 01 F 7/18 / А. А. Приходько, А. И. Смелягин ; Кубан. гос. тех. ун-т. — Заявл. 10.12.2014.

15. Перемешивающее устройство : патент 2528843 Рос. Федерация : МПК F 01 F 7/18 / А. А. Приходько, А. И. Смелягин ; Кубан. гос. техн. ун-т. — № 2013121535/05 ; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 20.09.2014, Бюл. № 26. — 5 с.

16. Перемешивающее устройство : патент 152110 Рос. Федерация : МПК F 01 F 7/16 / А. А. Приходько, А. И. Смелягин ; Кубан. гос. тех. ун-т. — № 2015103695/05 ; заявл. 04.02.2015 ; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. — 2 с.

References

1. Braginskiy, L.N., Begachev, V.I., Barabash, V.M. Peremeshivanie v zhidkikh sredakh: fizicheskie osnovy i inzh nernye metody rascheta. [Mixing in liquid environments: basic physics basis and engineering methods.] Leningrad: Khimiya, 1984, 336 p. (in Russian).

2. Hemrajani, R.-R., Tatterson, G.-B. Mechanically stirred vessels. Handbook of industrial mixing: science and practice. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004, pp. 345–390.

3. Cullen, P.-J., ed. Food mixing: Principles and applications. Singapore: Wiley-Blackwell, 2009, 292 p.

4. Delaplace, G., et al. Dimensional analysis for planetary mixer: mixing time and Reynolds numbers. Chemical Engineering Science, 2007, vol. 62, iss. 5, pp. 1442–1447.

5. Hiseman, M.-J.-P., et al. Granular flow in a planetary mixer. Chemical Engineering Research and Design, 2002, vol. 80, iss. 5, pp. 432–440.

6. Mudrov, A.G. Razrabotka prostranstvennykh peremeshivayushchikh ustroystv novogo pokoleniya, primenyaemykh v sel'skom khozyaystve i promyshlennosti : dis. … d-ra tekhn. nauk. [Development of spatial mixing devices of new generation applied in agriculture and industry: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Kazan, 1999, 493 p. (in Russian).

7. Smelyagin, A.I., Sachkov, V.G., Chusovitin, N.A. Ustroystvo dlya peremeshivaniya: patent 2113897 Ros. Federatsiya: MKI V 28 S 5/16. [Device for mixing.] Patent RF, no. 2113897, 1998 (in Russian).

8. Smelyagin, A.I, Yukhnevich, I.V. Strukturnyy sintez i kinematicheskiy analiz prostykh ispolnitel'nykh mekhanizmov vibroperemeshivayushchikh ustroystv. [Structural synthesis and kinematic analysis of simple actuator vibromixing devices.] Omsk Scientific Bulletin, 2012, no. 3 (113), pp. 72–75 (in Russian).

9. Tkachenko, R.N., Khristyuk, V.T., Smelyagin, A.I. Vliyanie vibratsionnoy obrabotki mezgi vinograda na khimicheskiy sostav vinomaterialov. [Influence of vibrating processing of grape husks and seeds on chemical composition of wine stock.] Storage and Processing of Farm Products, 2011, no. 10, pp. 52–55 (in Russian).

10. Ibanescu, C., et al. Study on vibromixing for polymer solutions. Iranian polymer journal, 1998, vol. 7, iss. 2, pp. 129–135.

11. Smelyagin, A.I., Yukhnevich, I.V. Strukturnyy i parametricheskiy sintez ispolnitel'nykh mekhanizmov vibroperemeshivayushchikh ustroystv. [Structural and parametric synthesis of actuators of vibromixing devices.] Izvestiya vuzov. Food Technology. 2013, no. 2/3, pp. 93–96 (in Russian).

12. Smelyagin, A.I. Struktura mekhanizmov i mashin. [Structure of machines and mechanisms.] Moscow: Vysshaya shkola, 2006, 304 p. (in Russian).

13. Smelyagin, A.I., Yukhnevich, I.V. Zubchatyy preobrazovatel' vrashchatel'nogo dvizheniya v vozvratno-vrashchatel'noe: patent 2528493 Ros. Federatsiya: MPK F 16 H 19/08. [Toothed converter of rotary motion into reciprocating movement.] Patent RF, no. 2528493, 2014 (in Russian).

14. Prikhodko, A.A., Smelyagin, A.I. Peremeshivayushchee ustroystvo: zayavka 2014150126 Ros. Federatsiya: MPK V 01 F 7/18. [Mixing device.] Application RF, no. 2014150126, 2014 (in Russian).

15. Prikhodko, A.A., Smelyagin, A.I. Peremeshivayushchee ustroystvo: patent 2528843 Ros. Federatsiya: MPK F 01 F 7/18. [Mixing device.] Patent RF, no. 2528843, 2014 (in Russian).

16. Prikhodko, A.A., Smelyagin, A.I. Peremeshivayushchee ustroystvo: patent 152110 Ros. Federatsiya: MPK F 01 F 7/16 [Mixing device.] Patent RF, no. 152110, 2015 (in Russian).

Поступила в редакцию 07.09.2015
Сдана в редакцию 08.09.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 627.762.5 DOI 10.12737/16068

Разрядно-импульсное прессование композиционных материалов*

С. В. Нескоромный[1], С. В. Лемешев[2], С. О. Агеев[3], Е. Л. Стрижаков[4]**
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Discharge-pulse compression of composite materials***

S. V. Neskoromniy[1], S. V. Lemeshev[2], S. O. Ageyev[3], E. L. Strizhakov[4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Повышение ресурса работы режущей части металлообрабатывающего инструмента за счет нанесения твердосплавных покрытий из порошковых материалов является актуальной задачей. Основное внимание в статье уделено результатам разработок в области электроспекания порошковых материалов в сочетании с механическим давлением. Приведено описание следующих перспективных методов консолидации порошковых материалов: электроимпульсного прессования (ЭИП), электроразрядного спекания (ЭРС), электроимпульсного спекания (ЭИС). Проанализированы устройства динамического нагружения порошковой композиции: пневмопресс, магнитный молот. Предложена совмещенная схема реализации процесса импульсного прессования — спекания с индукционно-динамическим приводом, которая позволяет синхронизировать тепловое и механическое воздействие на порошковую композицию. Представлены зависимости параметров процесса от времени, причем длительность пропускания тока, осуществляющего термическое воздействие, не превышает 200 мкс. Описаны возможности импульсного процесса.

Ключевые слова: разрядно-импульсное прессование, индукционно-динамический привод, разрядный ток, динамическое нагружение.

Increasing the operational life of the cutting end of the metal-working tool through face-hardening with powdered materials is an urgent task. The emphasis is on the research results in the field of electric sintering of powder materials in combination with mechanical pressure. The following perspective methods of the powder materials consolidation are described: electropulse compression (EPC), electro-discharge sintering (EDS), and electric pulse sintering (EPS). The devices for dynamic loading of the powder compositions – pneumatic press, magnetic hammer –are analyzed. A compatible scheme of the pulse compression process implementation – sintering with an inductive-dynamic drive which allows synchronizing the thermal and mechanical effects on the powder composition – is submitted. The process parameters dependencies on the time when the duration of the current passage making a thermal impact does not exceed 200 ms are presented. The possibilities of the pulse process are described.

Keywords: discharge-pulse compression, induction-dynamic gear, discharge current, dynamic loading.

Введение. Реализуемые в настоящее время методы консолидации порошковых материалов, использующие различные способы пропускания через порошок импульсов электрического тока в сочетании с механическим давлением, широко изучаются в научных центрах Российской Федерации и за рубежом [1, 2]. Наиболее интересные разработки импульсной консолидации порошковых материалов получены в лаборатории НИЯУ МИФИ [3].

Основная часть. Наиболее перспективными процессами консолидации порошковых материалов можно назвать методы электроразрядного спекания (ЭРС), электроимпульсного спекания (ЭИС) и электроимпульсного прессования (ЭИП) [4, 5].

Процесс ЭРС осуществляют пропусканием электрического тока (порядка 10^6 А) через порошок, предварительно сжатый механическим давлением, не превышающим 10МПа. Протекающий ток вызывает выделение теплоты в контактах частичек порошка по закону Джоуля-Ленца. Появление искровых разрядов между частичками обуславливает разрушение оксидных пленок. Выявлено, что наиболее существенное влияние на процесс разрушения оксидных пленок на поверхности частичек порошка наблюдается при высокочастотном токе 1 ÷ 1000 кГц.

При давлении подпрессовки ниже критического в порошковой заготовке наблюдается локальный электриче-

*Работа выполнена по договору №17 от 01.07.2013г. между ДГТУ и ООО НПП «Поток».
**E-mail: nescoromniy@mail.ru, lemeshev.serj@yandex.ru, stageev@inbox.ru, strizhakov@inbox.ru
*** The research is done within the frame of contract no. 17 of 01.07.2013 between DSTU and SPE “Potok” LLC.

ский пробой. В результате в образце возникает один или несколько каналов проводимости, причем происходит проплавление порошка, а не спекание. Величину критического давления подпрессовки определяют экспериментально. Установлено, что изменяя величину давления подпрессовки можно получать материалы с различными физико-механическими свойствами [6].

Процесс электроимпульсного спекания ЭИС заключается в помещении электропроводного порошка в диэлектрическую матрицу с последующим пропусканием электрического тока. Пуансоны, поджимающие порошковый материал используются только как токоподводы. В результате разряда батареи конденсаторов протекающий высоковольтный импульс тока длительностью $(1\div10)\cdot10^{-3}$с разрушает оксидные пленки порошка, а возникающие силы магнитного поля, направленные по радиусу к центру (пинч-эффект) уплотняют порошковую заготовку. Физический контакт частиц порошка осуществляется за счет оплавления контактных поверхностей и образования перешейков.

Степень уплотнения порошка зависит от размеров и формы частиц, а также параметров электрической цепи «установка – оснастка – порошковый материал».

Растровая электронная микроскопия показала, что полного уплотнения порошка при ЭИС не происходит. Это можно объяснить наличием в порах и карманах газов при спекании порошков со сферической формой частиц [7, 8].

При расплавлении контактов частиц порошка, растворение газа в жидком металле увеличивается, происходит образование пузырьков, которые при кристаллизации образуют поры, а объединяясь — небольшие полости и каналы, рис. 1.

Процесс электроимпульсного прессования (ЭИП) заключается в одновременном кратковременном воздействии длительностью менее 10^{-3} с, плотностью тока до 10^{7} А/см^{2} и внешним прессующим давлением на порошковую заготовку порядка 50÷500 МПа [6].

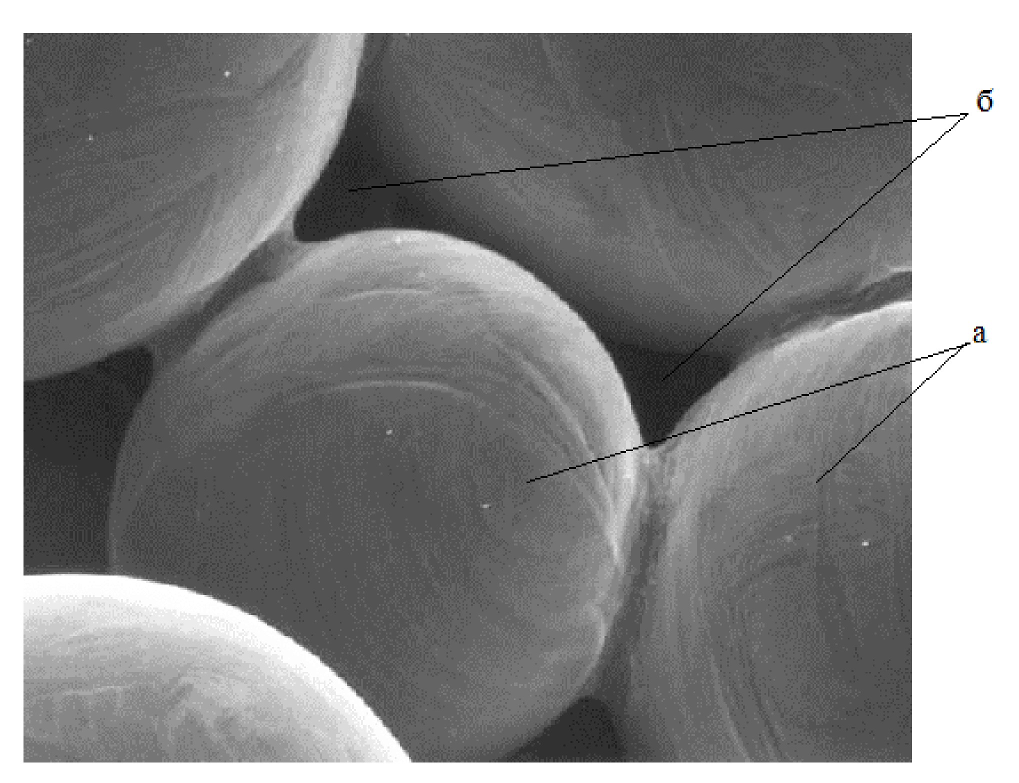


Рис. 1. Пористая структура порошковой композиции, полученная ЭИС, х200
а — частички порошка; б — поры, в совокупности образующие полости и каналы

Принципиальная схема процесса электроимпульсного прессования приведена на рис. 2. Порошковый материал 1 помещается в матрицу 2 из диэлектрического материала. Электроды-пуансоны 3 передают давление на порошковую заготовку от устройства нагружения (пневмопресс) и одновременно служат токоподводами от генератора импульсных токов к прессуемому порошку 1. Для создания теплового воздействия на порошок используется батарея высоковольтных импульсных конденсаторов с запасаемой энергией 1÷100 кДж, разряд которой, обеспечивает кратковременное энерговыделение в порошковой прессовке.

Установлено, что определяющими факторами при ЭИП являются скорость ввода энергии электромагнитного поля в порошковый материал, характер и величина механического давления, приложенного к порошковому материалу. Высокая плотность энергии в зонах контактов частиц вызывает изменение агрегатного состояния твердого порошка в жидкое и, частично, в плотную низкотемпературную плазму [9].

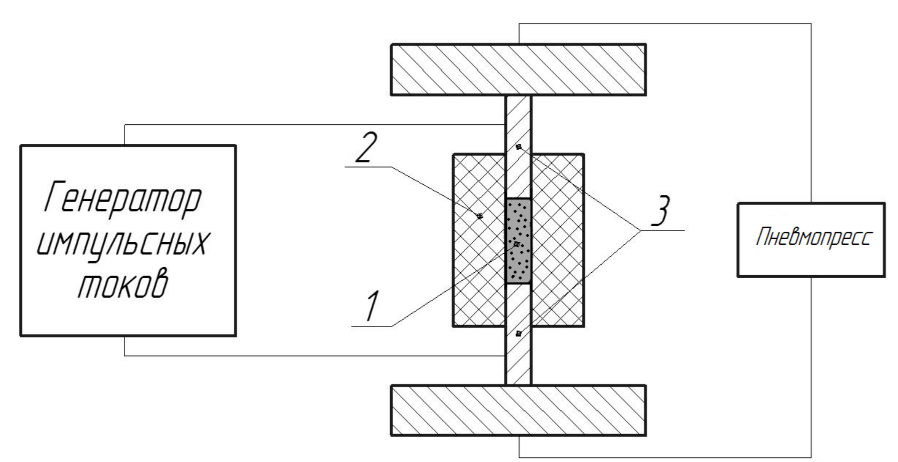


Рис. 2. Схема процесса электроимпульсного прессования

За счет разных удельных электросопротивлений в зоне контактов частиц порошкового материала и в контакте «пуансон – порошок», импульс тока, проходящий через порошковую заготовку и пуансоны, интенсивно разогревает только порошковый материал [9].

При интенсивном нагреве порошкового материала резко снижается его сопротивление пластическому деформированию и под действием внешнего механического давления он уплотняется с большой скоростью, зависящей от системы нагружения. Одновременно с этим происходит теплоотвод от порошковой прессовки в пуансоны и матрицу за счет теплопроводности.

Для формирования монолитной структуры спеченного порошка необходимо выполнение условия [7]:

$$t_0 < t_1 < t_2, \quad (1)$$

где t_0 — время формирования компактного материала из порошковой заготовки, зависит от длительности ввода тепловой энергии, $t_0 < 10^{-3}$ с; t_1 — время механического воздействия на прессуемый материал, зависящее от механической системы нагружения; $t_1=(0{,}2\div2)\cdot10^{-2}$ с; t_2 — время охлаждения, определяющееся теплопроводностью прессуемого материала и характерными размерами полученного образца, $t_2 = 0{,}1\div10$ с [3, 9].

Использование импульсных источников энергии предопределяет усовершенствование систем механического нагружения, в противном случае условие 1 не будет выполняться. Так, при использовании пресса, имеющего инерционность хода, возникает сложность синхронизации динамического воздействия на порошок с импульсом тока, из-за малой длительности последнего.

Известны разработки по использованию магнитного молота для прессования порошка [6, 11]. В данном процессе импульсное магнитное поле плоского индуктора 1 возбуждает электромеханические усилия в толкателе 2, передающем эти усилия на прессуемый материал 3 через пуансон 4, рис. 3.

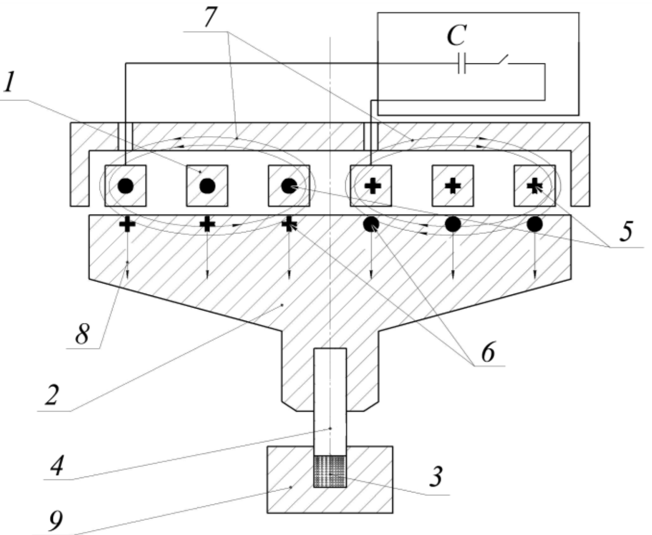


Рис. 3. Принципиальная схема магнитного молота

Разрядный ток 5, протекающий в цепи конденсаторная батарея C — плоский индуктор 1, имеет синусоидаль-

ный затухающий характер, обуславливающий наведение индуцированных токов 6 в толкателе 2. Взаимодействие магнитного потока 7 с индуцированными токами 6 обуславливает в толкателе 2 импульс магнитного давления 8, который обеспечивает механическое воздействие пуансона 4 на прессуемый порошок 3, помещенный в матрицу 9.

Сотрудниками кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ было предложено встроить магнитный молот (индукционно-динамический привод) в сварочную цепь для передачи усилия на пуансоны с одновременным пропусканием разрядного тока через спекаемый порошок [10]. Схема устройства приведена на рис. 4.

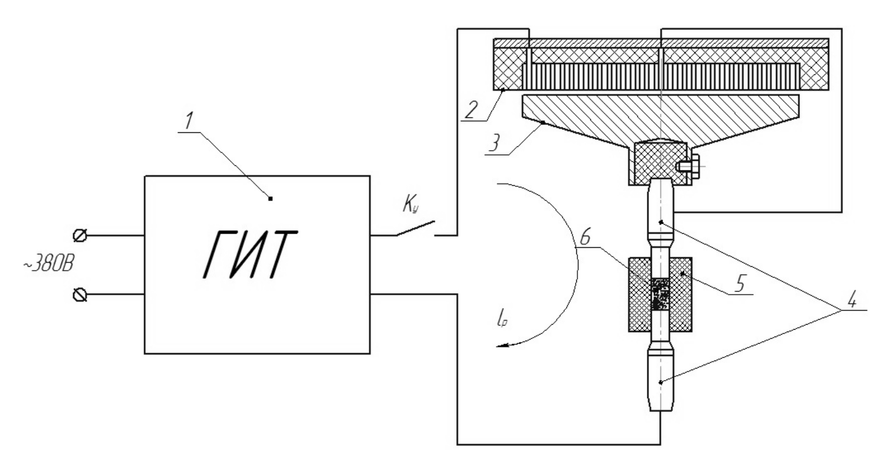


Рис. 4. Схема высоковольтного импульсного прессования с индукционно-динамическим приводом

Порошковый материал 6 помещается в матрицу 5 из диэлектрического материала. Электроды-пуансоны 4 передают давление на порошковую заготовку 6 от индукционно-динамического привода (ИДП) состоящего из индуктора 2, толкателя 3 и одновременно служат токоподводами от генератора импульсных токов (ГИТ) к прессуемому порошку 6. При срабатывании коммутирующего устройства $K_у$, ток разряда $I_р$ протекает через ИДП, электроды-пуансоны 4 и порошок 6. Во время прохождения тока $I_р$ через индуктор 2 возникает магнитное давление на толкатель 3, передающее импульсное усилие пуансонам 4. В результате этого создаётся динамическое усилие подпрессовки порошковой заготовки.

Для создания мощных импульсов тока используется батарея высоковольтных импульсных конденсаторов емкостью 150÷600 мкФ, разряд которой обеспечивает интенсивное энерговыделение в порошковой прессовке. Конденсаторы объединены в ГИТ. Перед пропусканием импульса тока порошок статически прижимается электродами-пуансонами 4. Последовательное соединение ИДП с системой «электроды – порошок», обеспечивает синхронизацию динамического давления $P_м$ с тепловым воздействием, что позволит повысить плотность порошковой композиции. Вводимая энергия, расходуемая на тепловое и силовое воздействие, составляла 3000÷7000 Дж.

На рис. 5 представлены зависимости параметров импульсного процесса от времени.

Измерения разрядного тока производили с помощью бесконтактного датчика — пояса Роговского. Длительность протекания тока $I_р$ через пуансоны и порошок не превышает 300мкс. Высота прессовки порошковой заготовки снижается на 30 ÷ 50%.

Высоковольтная электроимпульсная технология позволяет получать псевдосплавы (вольфрам-медь, алюминий-свинец), проводить синтез соединений металлов с неметаллами из механических смесей заданных компонентов, изготавливать магнитные материалы на основе порошков железа, которые обеспечивают эксплуатационные характеристики магнитопроводов выше, чем применяемые в настоящее время в промышленности. Также данная технология позволяет изготавливать объемно-пористые тела, имеющие высокую открытую пористость, большую удельную поверхность и обладающие хорошими прочностными характеристиками [8, 11].

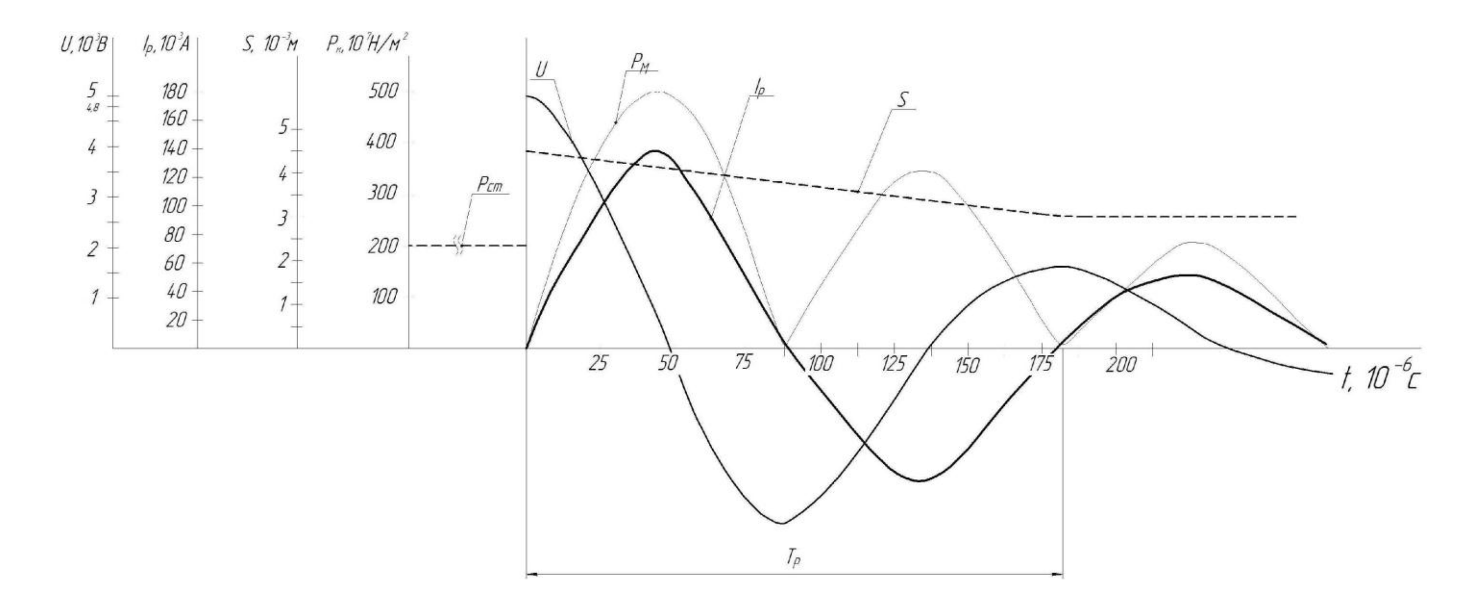


Рис.5. Зависимости параметров процесса от времени
U — напряжение заряда батарей конденсаторов; *Ip* —ток разряда; *Pм* — динамическое давление;
Рст — статическое нагружение, *S* — высота прессовки,; *t* — время

Импульсная консолидация с магнитно-импульсным воздействием позволяет наносить твердый сплав из порошка на стальную подложку и возможностью регулирования его толщины. Использование импульсного разрядного тока позволяет сконцентрировать тепловыделение только в зоне контакта порошковой композиции с подложкой, что значительно снижает уровень остаточных напряжений в твердосплавном покрытии. Кратковременность процесса снижает возможность роста зерен карбидной фазы за счет перекристаллизации, что существенно повышает эксплуатационные свойства покрытия нанесенного на режущие кромки металлообрабатывающего инструмента (пуансоны, резцы и т. д.).

Заключение. Использование импульсного электроспекания порошковых композиций открывает широкие возможности получения материалов с особыми свойствами. Применяемое устройство механического воздействия (пневмопресс) не обеспечивает повышения плотности прессуемого порошка из-за кратковременности процесса. Повышение физико-механических свойств порошковых композиций возможно за счет синхронизированного воздействия на спекаемый материал: термического и механического. Протекающий импульс тока обеспечивает разрушение окисных пленок на частичках порошка и разогревает их, механическое воздействие индукционно-динамическим приводом обеспечивает повышение плотности порошковой композиции.

Библиографический список

1. Баранов, Ю. В. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю. В. Баранов [и др.]. – Москва : МГИУ, 2001. — 844 с.

2. Спекание металлических порошков серией сильноточных импульсов / Н. Н. Заводов [и др.]. — ТВТ, 1999. — Т. 37, вып. 1. — С. 135–141.

3. Grigoriev, E. Electro discpaction of WC – Co composite material containing particles of diamond / E. Grigoriev, A. Rosliakov // Materials Science Forum. — 2007. — Vol. 534 — 536. P. 1181–1184.

4. Миронов, В. А. Магнитно-импульсное прессование порошков / В. А. Миронов. — Рига : Знание, 1980. — 196 с.

5. Особенности воздействия электрического разряда в процессе консолидации порошков / А. И. Райченко [и др.]. // Вiсник НТУ «ХПI». Серiя: Технiка та електрофiзика високих напруг. — Х. : НТУ «ХПI», 2012. — № 52 (958). — С. 146–154.

6. Григорьев, Е. Г. Кинетика процессов уплотнения дисперсных материалов при электроимпульсном воздействии / Е. Г. Григорьев. — Москва : Известия РАН. Серия физическая, 2008, Т. 72, № 9. — С. 1210–1212.

7. Лемешев, С. В. Высоковольтное ударное электроимпульсное спекание / С. В. Лемешев [и др.]. — Ростов-на – Дону : Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях: сб. трудов межд. науч. симпозиума технологов – машиностроителей и механиков, 2014. — С. 130–136.

8. Стрижаков, Е. Л. Импульсная консолидация порошков с индукционно-динамическим нагружением /

Е. Л. Стрижаков [и др.]. — Николаев : Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: материалы XVI межд. науч. конф., 2013. — С. 152–155.

9. Райченко, А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А. И. Райченко. — Москва : Металлургия, 1987. — 129 с.

10. Устройство для электроимпульсного спекания: патент 96515 Рос. Федерация: B22F 3/087. – Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, М. А. Рачков. — № 2013114033 / 02; заявл. 28.03.2013 ; опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2. — 2 с.

11. Белявин, К. Е. Получение пористых материалов из тугоплавких металлов методом электроимпульсного спекания / К. Е. Белявин, В. К. Шелег // Теория и практика машиностроения, 2004. — № 2. — С. 68–77.

References

1. Baranov, Y.V., et al. Fizicheskie osnovy elektroimpul'snoy i elektroplasticheskoy obrabotok i novye materialy. [Physical fundamentals of electropulse and electroplastic treatment and new materials.] Moscow: MGIU, 2001, 844 p. (in Russian).

2. Zavodov, N.N., et al. Spekanie metallicheskikh poroshkov seriey sil'notochnykh impul'sov. [Sintering of metal powders by a series of heavy current pulses.] High Temperature, 1999, vol. 37, iss. 1, pp. 135–141 (in Russian).

3. Grigoriev, E., Rosliakov, A. Electro discpaction of WC – Co composite material containing particles of diamond. Materials Science Forum, 2007, vol. 534 — 536, pp. 1181–1184.

4. Mironov, V.A. Magnitno-impul'snoe pressovanie poroshkov. [Magnetic pulse pressing of powders.] Riga: Znanie, 1980, 196 p. (in Russian).

5. Raichenko, A.I., et al. Osobennosti vozdeystviya elektricheskogo razryada v protsesse konsoli¬datsii poroshkov. [Features of electric discharge effect in the process of consolidating powders.] Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. Khar'kov: NTU "KhPI", 2012, no. 52 (958), pp. 146–154 (in Russian).

6. Grigoryev, E.G. Kinetika protsessov uplotneniya dispersnykh materia¬lov pri elektroimpul'snom vozdeystvii. [Kinetics of the Consolidation Processes in Dispersed Materials under Electric-Pulse Effect.] Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2008, vol. 72, no. 9, pp. 1210–1212 (in Russian).

7. Lemeshev, S.V., et al. Vysokovol'tnoe udarnoe elektroimpul'snoe spekanie. [High impact electropulse sintering.] Rostov-na-Donu: Volnovye, vibrovolnovye tekhnologii v mashinostroenii, metalloobrabotke i drugikh otraslyakh: sb. trudov mezhd. nauch. simpoziuma tekhnologov – mashinostroiteley i mekhanikov, 2014. [Rostov-on-Don: Wave, vibrowave technologies in mechanical engineering, metalworking, and other industries: Proc. Int. Sci. Symposium of engineers – mechanicians and mechanics, 2014.] pp. 130–136 (in Russian).

8. Strizhakov, E.L., et al. Impul'snaya konsolidatsiya poroshkov s induktsionno-dinamicheskim nagruzheniem. [Pulse consolidation of powders with inductive-dynamic loading.] Nikolaev: Fizika impul'snykh razryadov v kondensirovannykh sredakh: materialy XVI mezhd. nauch. konf., 2013. [Nikolayev: Physics of pulsed discharges in condensed media: Proc. XVI Int. Sci.Conf., 2013.] pp. 152–155 (in Russian).

9. Raichenko, A.I. Osnovy protsessa spekaniya poroshkov propuskaniem elektricheskogo toka. [Fundamentals of sintering powders by electric current transmission.] Moscow: Metallurgiya, 1987, 129 p. (in Russian).

10.Strizhakov, E.L., Neskoromniy, S.V., Rachkov, M.A. Ustroystvo dlya elektroimpul'snogo spekaniya: patent 96515 Ros. Federatsiya: V22F 3/087. [A device for sintering electropulse.] Patent RF no. 96515, 2014 (in Russian).

11.Belyavin, K.E, Sheleg, V.K. Poluchenie poristykh materialov iz tugoplavkikh metallov metodom elektroimpul'snogo spekaniya. [Formation of porous materials from refractory metals by electroimpulse sintering.] Teoriya i praktika mashinostroeniya, 2004, no. 2, pp. 68–77 (in Russian).

Поступила в редакцию 02.02.2015
Сдана в редакцию 04.02.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.168:856.2 DOI 10.12737/16074

Экспериментальное исследование возможностей решения многоэкстремальных задач оптимизации эвристическими методами*

Р. А. Нейдорф[1], И. В. Черногоров[2], О. Т. Ярахмедов[3], В. В. Полях[4] **
[1, 2, 3, 4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Experimental study on solution possibilities of multiextremal optimization problems through heuristic methods ***

R. A. Neydorf [1], I. V. Chernogorov [2], O. T. Yarakhmedov [3], V. V. Polyakh[4] **
[1, 2, 3, 4]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является исследование актуальной задачи поисковой оптимизации многоэкстремальных объектов, которая существенно сложнее одноэкстремальных задач. Показано, что для достижения поставленной цели пригодны лишь эвристические методы. Поэтому исследуются три наиболее известных и разработанных метода поисковой оптимизации: метод роящихся частиц, эволюционно-генетический подход и муравьиный алгоритм. Анализ проводится в среде общей для всех методов тестовой задачи исследования многоэкстремальной функции Растригина. Показано, что все указанные методы вполне пригодны для решения многоэкстремальных задач. Хотя в каждом из эвристических алгоритмов приходится использовать собственные специфические подходы к решению задачи обнаружения и идентификации локальных экстремумов, их объединяет необходимость осуществления кластеризации данных. Каждый метод может обеспечить любую заданную точность решения экстремальной задачи и использует приемлемый ресурс времени.

Ключевые слова: оптимизация, экстремум, многоэкстремальность, поисковая оптимизация, кластери-зация, эвристические методы, эволюционно-генетический подход, метод роящихся частиц, муравьиный алгоритм.

The work objective is to study a vital task of the multiextremal objects search engine optimization which is much more complicated than monoextremal problems. It is shown that only heuristics is appropriate in achieving this goal. Therefore, three best known and developed search engine optimization techniques are studied: particle swarm method, evolutionary genetic approach, and ant colony algorithm. The analysis is performed in the environment common for all methods of the test research problems of the multiextremal Rastrigin function. It is proved that all these methods are well suited for the multiextremal problem solution. While it is necessary to use proper specific approaches to solving the local extremum detection and identification problem in each of the heuristic algorithms, they all require data clustering. Each method can provide any desired accuracy of the extremum problem solution, and it utilizes an acceptable time resource.

Keywords: optimization, extremum, multiextremality, search engine optimization, clustering, heuristic methods, evolutionary genetic approach, particle swarm method, ant colony algorithm.

Введение. Многие современные проблемы науки, техники, экономики, военного дела и пр. связаны с решением задач поиска оптимальных характеристик объектов проектирования: конструкций, технологий, режимов и условий работы, динамических и статических состояний и т. д. Иными словами, разработчикам приходится решать задачи поисковой оптимизации (ПО) [1–3]. Характерно, что большинство известных на сегодня методов ПО разработано и эффективно используется для нахождения одного оптимума — чаще всего, глобального [3, 4]. Однако многие задачи планирования, сложные технологические комплексы, транспортные задачи и другие объекты оптимизации (особенно дискретной природы) характеризуются многоэкстремальностью (МЭ) [4–11]. Столь существенное отличительное свойство требует специфических методов решения таких задач. Вряд ли эти методы целесообразно искать в классе детерминированных методов ПО. Они слишком чувствительны к знакопеременности и разрывности функций отклика в конти-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: ran_pro@mail.ru, hintaivr@gmail.com, orhashka@gmail.com, silvervpolyah@gmail.com
***The research is done within the frame of the independent R&D.

нуальных факторных пространствах, а также описываются NP-полными алгоритмами в дискретных факторных пространствах. Для решения большинства реальных оптимизационных задач все чаще стремятся применять методы, получившие название «эвристические». Эти методы наиболее перспективны и для решения МЭ задач [5–11].

Постановка задачи. В связи со сказанным во введении представляется актуальным и перспективным исследование наиболее распространенных эвристических методов ПО в среде какой-либо характерной МЭ задачи. Цель работы: установить возможность нахождения нескольких или всех экстремумов рассматриваемой области каждым из выбранных методов. Кроме того, необходимо оценить точность определения значений экстремумов и их координат. Поэтому первым этапом исследований является выбор тестовой МЭ функции, которая может послужить общей для всех методов средой решения МЭ задач.

Выбор многоэкстремальной тестовой функции и предварительный анализ ее свойств. Самыми распространенными и эффективными тестовыми функциями, используемыми для отладки и исследования методов ПО, являются функции Розенброка, Химмельблау и Растригина. Из них наиболее многоэкстремальная — функция Растригина (ФР). Эта невыпуклая универсальная функция предложена в 1974 году Леонардом Растригиным [12]. Уравнение функции N аргументов имеет вид:

$$f(x) = A \times \text{n} + \sum_{i=1}^{n} [x_i^2 - A \times \cos(2 \times \pi \times x_i)] \tag{1}$$

где $A = 10$.

Глобальный минимум этой функции — $f_{min}^{gl}(0) = 0$.

Нахождение глобального минимума данной функции представляет собой достаточно трудную задачу из-за большой области поиска и количества локальных минимумов, на которых алгоритм может зацикливаться. Выделение и оценка локальных экстремумов является еще более сложной и неординарной задачей.

Исследование ФР алгоритмом роящихся частиц. Сущность и основания для использования в задачах ПО метода роящихся частиц (МРЧ) хорошо известны [13–17]. Классический алгоритм МРЧ имитирует реальную групповую поведенческую модель насекомых, птиц, рыб, многих простейших и т. п. Однако МЭ объекта оптимизации требует некоторых специфических свойств алгоритма. Поэтому канонический вариант МРЧ был значительно переработан авторами [18–20] и другими учениками Р. А. Нейдорфа [7–11]. В частности, разработана его модификация для решения МЭ задач.

Модель механического движения (ММД) частиц [20] в МЭ МРЧ была существенно доработана и уточнена:

$$X_{ti} = X_{(t-\Delta t)i} + \vec{V}_{(t-\Delta t)i} \times \Delta t, \tag{2}$$

$$\vec{V}_{ti} = \vec{V}_{(t-\Delta t)i} + \vec{A}_{(t-\Delta t)i} \times \Delta t, \tag{3}$$

$$\vec{A}_i = \vec{A}_{pi} + \vec{A}_{tri}, \tag{4}$$

где $X_{(t-\Delta t)i}$ — предыдущее положение i-й частицы; X_{ti} — ее текущее положение; $\vec{V}_{ti}$ — скорость i-й частицы в текущий момент времени; $\vec{V}_{(t-\Delta t)i}$ — предыдущая скорость частицы; $\vec{A}_{(t-\Delta t)i}$ — предыдущее ускорение частицы в предыдущий момент времени; Δt — интервал интегрирования по времени; $\vec{A}_{pi}$ — ускорение под действием биологически обусловленных сил притяжения частиц; $\vec{A}_{tri}$ — замедление под действием сил трения.

Для улучшения поисковых свойств было введено стохастическое размытие параметров:

$$\lambda^{\xi}(\varepsilon) = \lambda \times (1 + 2 \times \varepsilon(rnd(1) - 0{,}5)), \tag{5}$$

где $\lambda^{\xi}(\varepsilon)$ — значение флуктуирующего параметра на такте вычисления; ε — относительное отклонение искажаемого параметра от номинального значения; $rnd(1)$ — случайное число в диапазоне [0, 1].

Предложены и проверены механизмы естественной кластеризации частиц, порождаемой и параметрически настраиваемой свойствами алгоритма:

— градиентный, основанный на чувствительности частиц к смене знака скорости изменения оптимизируемого критерия исследуемого объекта [7–9];

— потенциальный, основанный на введении в ММД сил притяжения ко всем обнаруженным при роении и сканировании пространства поиска локальным экстремумам:

$$\vec{A}_{pi} = \vec{A}_{pi}^{G} + \vec{A}_{pi}^{L} + \vec{A}_{pi}^{C}. \tag{6}$$

Здесь $\vec{A}_{pi}^{G}$ — притяжение частицы к глобальному экстремуму; $\vec{A}_{pi}^{L}$ — притяжение частицы к локальному экстремуму; $\vec{A}_{pi}^{C}$ — притяжение частицы к центру ближайшего кластера.

Алгоритм МЭ МРЧ показал хорошую избирательность при локализации областей экстремумов, однако механизмы кластеризации и локализации кластеров потребовали существенной структурной и параметрической доработки. В настоящем исследовании введены и проверены следующие модификации:

— механизм отсева по определенным критериям «плохих» кластеров (являющихся худшими на заданном числе итераций);

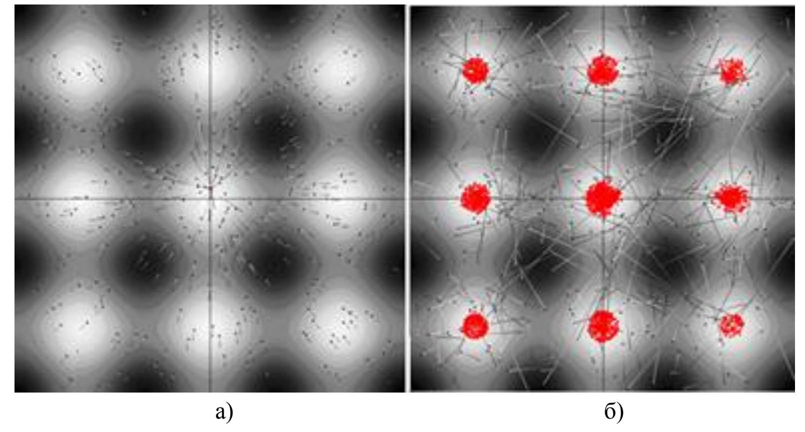
— механизм объединения схожих кластеров на каждом шагу;

— настройка условного притяжения к центру ближайшего кластера;

— механизм локализации областей кластеров и поиска в них параметров локальных экстремумов.

Эффективность модификаций проверена ФР в диапазоне координат $(x, y) \in [-1.5, 1.5]$. В этой области ФР имеет 9 локальных минимумов, один из которых является глобальным.

На рис. 1 отображен процесс локализации областей экстремумов и создания соответствующих кластеров.

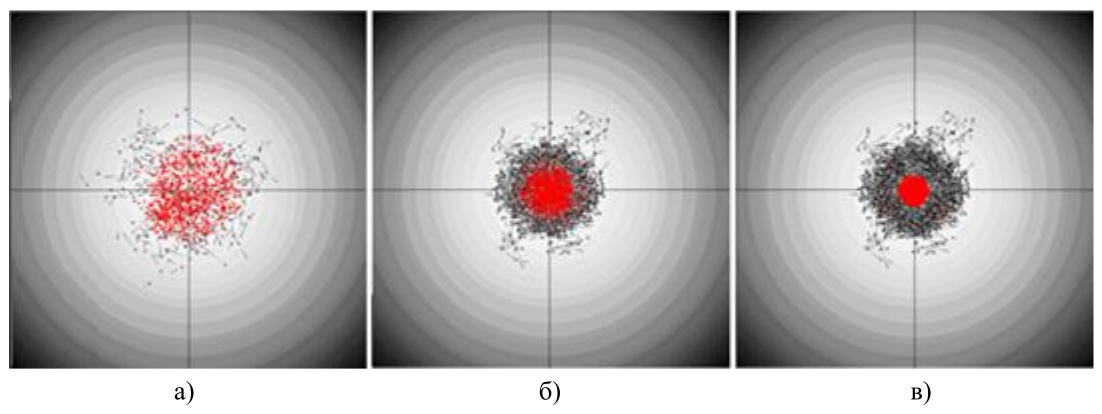


а) б)

Рис. 1. Локализация областей экстремумов: 1-я итерация (а); 50-я итерация (б)

Как видно из рис. 1, частицы изначально притягивались к образовавшемуся кластеру, который располагался в области глобального экстремума. Затем периферийные частицы находили локальные экстремумы, притягивались к ним и собрались в кластеры. В суженных областях кластеров применение алгоритма МЭ МРЧ (на случай наличия менее выделенных и значимых экстремумов) повторяется. Этот процесс итеративно повторяется до получения требуемой точности оценки параметров всех локальных и глобального экстремумов.

На рис. 2 отображены фрагменты итеративной идентификации локального экстремума, который располагается в точке [–1, 1].



а) б) в)

Рис. 2. Локальная идентификация одного из локальных экстремумов: 15-я итерация (а); 33-я итерация (б); 50-я итерация (в)

В табл. 1 отображены результаты, полученные локализацией всех областей, приведены координаты $x = x_1$ и $y = x_2$, а также значения ФР, полученные по формуле (1). Как видно, получены удовлетворительные результаты с временными затратами ~149 с. С увеличением числа итераций (и времени поиска) точность оценки повышается.

Таблица 1

Результаты проведенного опыта

Эталон			Параметры оценки экстремума		
			Координаты		Значение
x	*y*	*f (x, y)*	*x*	*y*	*f (x, y)*
–1	1	2	–0,9957	0,9953	1,9901
–1	0	1	–0,9949	0,0001	0,995
–1	–1	2	–0,9951	–0,9947	1,9899
0	1	1	$-3{,}20\times10^{-5}$	0,9948	0,995
0	0	0	$9{,}85\times10^{-5}$	$-6{,}49\times10^{-6}$	$1{,}94\times10^{-6}$
0	–1	1	0,00017	–0,995	0,995
1	1	2	0,9949	0,995	1,9899
1	0	1	0,995	0,00011	0,995
1	–1	2	0,9952	–0,9951	1,9899

Для решения задачи МЭ МРЧ использован ПК с процессором AMD Phenom II P960, оперативная память — 6Gb. При этом для достижения точности 1E-3 удалось ограничиться 50 итерациями и осуществить локализацию областей экстремумов с затратами по времени — 149 с. При дополнительном исследовании каждой из областей потребовалось в среднем — 2,5–3,5 мин на одну область и порядка 30 мин на все 9 областей.

Таким образом, можно сделать вывод, что МЭ МРЧ является эффективным инструментом решения МЭ задач. Исследование ФР эволюционно-генетическим алгоритмом. Эволюционно-генетический алгоритм (ЭГА) является одним из наиболее востребованных инструментов решения оптимизационных задач [21–24]. Структура и основные операторы ЭГА хорошо известны, а конкретные структурно-параметрические особенности зависят от предметного приложения. В частности, применение ЭГА для решения МЭ задач [25–28] требует дополнения классического ЭГА инструментами селектирования экстремумов — по типу (максимум, минимум), по величине, а также по координатам его положения в факторном пространстве. В данной работе развивается подход к селекции экстремумов, основанный на использовании одновыборочного критерия Стьюдента [27–29]. Сущность данного подхода может быть представлена следующим образом. При последовательном использовании ЭГА результаты, полученные в финишных поколениях, кластеризуются, т. е. разделяются по координатным группам. С этой целью для каждого результата проверяется 0-гипотеза.

Математическая модель данного подхода кластеризации заключается в последовательном сравнении векторов со средним значением группы векторов

$$v = \{\Delta v_i = v_i - v_0 \mid i = \overline{1,n}\},$$

где n — количество векторов группы.

Относительно заданной доверительной вероятности принимается решение о принадлежности вектора v существующему множеству. Для уточнения принадлежности необходимо рассчитать среднее значение длин векторов группы, с которой производится сравнение:

$$\Delta v = \sum_{i=1}^{n} \Delta v / n . \quad (7)$$

После необходимо вычислить стандарт отклонения длин векторов уже обозначившегося кластера:

$$S_{\{\Delta v\}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\Delta\bar{v} - v)^2 / (n-1)} , \quad (8)$$

$$S_{\{\Delta\bar{v}\}} = S_{\{\Delta v\}} / \sqrt{n} . \quad (9)$$

По вычисленным величинам рассчитываются опытные значения одновыборочного критерия Стьюдента:

$$t_0 = |\Delta\bar{v} - \Delta v| \,/\, S_{\{\Delta\bar{v}\}} \,. \qquad (10)$$

Если найденное опытное значение t_0 не превосходит табличного [30] значения t_r при n степеней свободы и выбранном в таблице уровне доверительной вероятности P, то можно считать, что t_0 принадлежит данной группе объектов.

Данный метод хорошо зарекомендовал себя при исследовании МЭ зависимостей [27–31].

С учетом этого подхода разработаны алгоритм и программное средство (ПС) на его основе. С помощью ПС ФР рассмотрена в том же диапазоне, что и в предыдущем разделе статьи при исследовании ФР алгоритмом роящихся частиц.

Структура входных параметров ЭГА, которая была использована при исследовании ФР, включает в себя поколений — 10, особей в каждом поколении — 1000, вероятность кроссинговера — 95 % и мутации — 30 %. Стоит отметить, что параметр области поиска используется тот же, что и в предыдущем разделе, а точность исследования в этой области равна 7 разрядам после запятой. В результате выделено 9 кластеров, минимумы которых можно соотнести с теми минимумами ФР, которые попали в исследуемую область.

На рис. 3 отображены графики последовательного нахождения значений ФР и их различных координат (X и Y), а также соответствующие им значения целевой функции (F (X, Y) ≈ 2), которые, в свою очередь, упорядочены по убыванию (для кластеров, образованных вокруг минимумов со значениям (–1;1), (1;–1), (1;1), (–1;–1)).

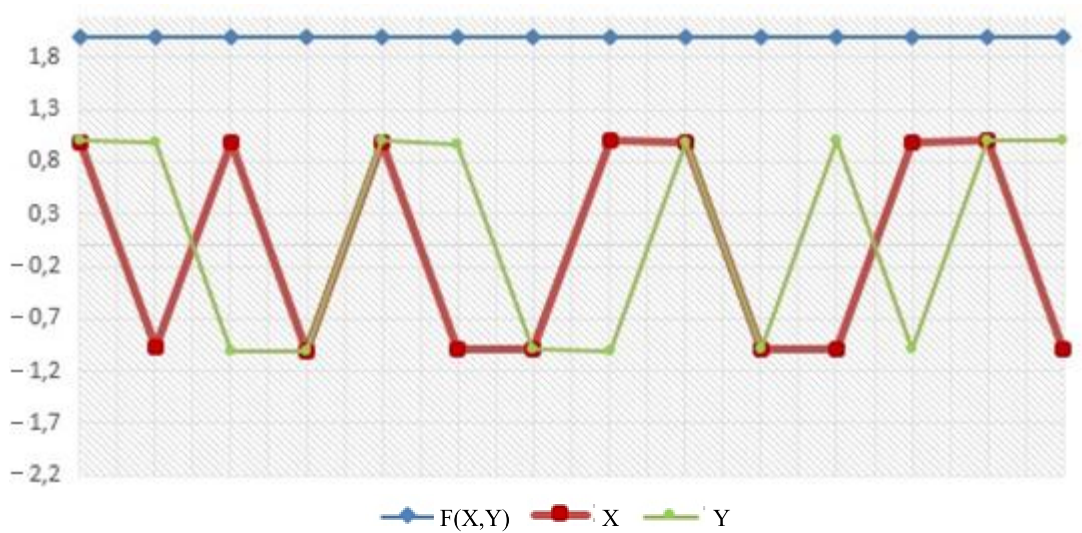
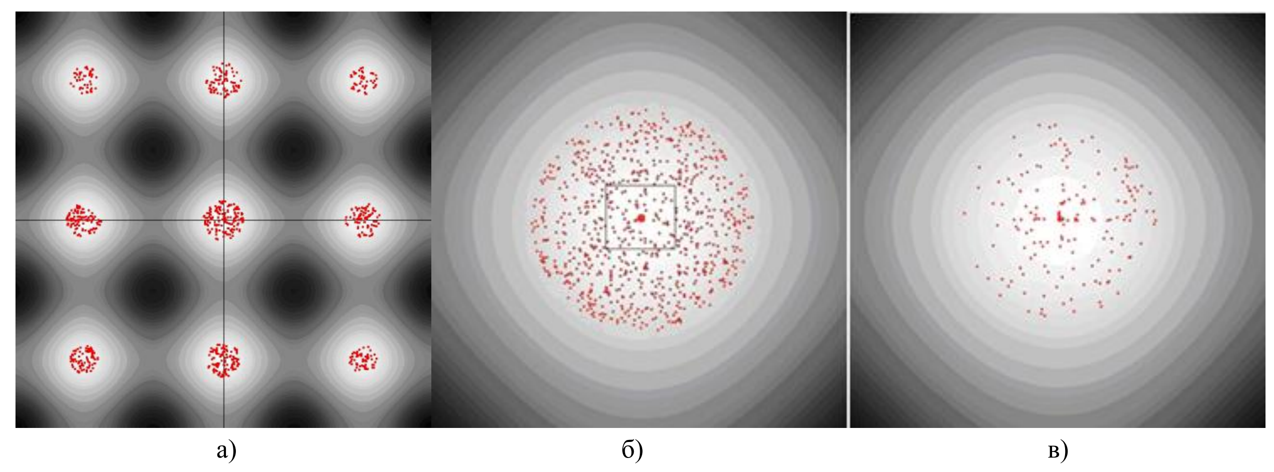


Рис. 3. Выделение кластеров в ходе эксперимента

На рис. 4, а восемь периферийных кластеров характеризуют локальные минимумы, а центральный кластер содержит результаты, приближающиеся к глобальному минимуму функции. Хорошо видно, что близкие (а в некоторых случаях равные) по значению функции цели имеют существенные отличия по координатным показателям (т. е. параметры функции цели, обеспечивающие близкие к минимуму значения, разнятся). Данный факт подтверждает многоэкстремальность исследуемого объекта.



а) б) в)

Рис. 4. Локализация областей экстремумов. Выделенные кластеры ФР (а) и формирование кластеров в локализованной области: 100-е поколение (б); 110-е поколение (в)

Результаты исследования функции (как на глобальный, так и на локальные минимумы) отображены в табл. 2.

Таблица 2

Найденные параметры функции цели первой итерации (по кластерам)

Эталон				Параметры оценки экстремума		
№	x	y	$f(x, y)$	Координаты		Значение
				x	y	$f(x, y)$
1	0	0	0	0,00188	0,00015	0,00071
2	–1	0	1	–0,98932	0,00073	1,00137
3	0	–1	1	0,00824	–1,00043	1,01436
4	1	0	1	0,99948	–0,01328	1,03398
5	0	1	1	0,01403	1,00665	1,0611
6	1	–1	2	0,99146	–0,99314	1,993
7	1	1	2	0,99702	1,00467	2,00947
8	–1	–1	2	–0,9897	–1,01397	2,06707
9	–1	1	2	–1,00528	1,00077	2,01775

Как видно из табл. 2, оценки значений экстремумов и их координат не отличаются высокой точностью. В случае, если найденные значения не удовлетворяют требуемой точности, реализуется повторное исследование минимумов функции в области кластеров.

В качестве примера приводятся исследования областей кластеров 2, 4 и 8 методом локализации поисковой области [29] (табл. 3). Дальнейший поиск значений осуществляется использующим ЭГА методом, разработанным авторами [27, 28].

Наглядно кластер найденных ЭГА статистически близких значений в одной из областей можно наблюдать на рис. 4, б. Наилучшая оценка экстремума выделена жирной точкой. Для повышения точности оценки вокруг этого субэкстремума программой выделяется область дополнительного исследования, результаты анализа которой визуализированы на рис. 4, в.

Уточненные на второй итерации значения функций цели, а также соответствующих им координат приведены в табл. 3.

Таблица 3

Найденные параметры значения функции цели второй итерации

	2-й кластер	4-й кластер	8-й кластер
Значение X	–0,999996	0,999992	–0,999996
Значение Y	0,000005	–0,000008	–1,000005
Значение ФР	0,999997	0,999989	1,999991

Исследование ФР муравьиным алгоритмом. Муравьиные алгоритмы (МА) — еще одна группа методов, которая используется в различных оптимизационных задачах. Их отличительная особенность заключается в имитации ключевых черт поведения настоящих муравьев [32]. Чаще всего МА применяются к задачам минимизации пути на графах [33], однако данные алгоритмы показывают хорошие результаты и в других областях [34, 35]. В представленной работе рассмотрено применение классического МА для МЭ оптимизации эталонной двухпараметрической ФР [12].

В основе описываемого метода лежит классическая реализация МА, применяемая к задачам на графе [36, 37, 38], но с некоторым дополнением. Рассматриваемое пространство делится на равные участки [39].

Как и в классическом МА, в данной модификации выделяются такие этапы, как «расстановка и инициализация», «осуществление перехода» и «проверка условия останова».

В качестве примера был рассмотрен фрагмент ФР для $x \in [-1.5, 1.5]$, $y \in [-1.5, 1.5]$. Он разделен на n×n участков, каждый из которых ассоциируется со значением функции в центре и наделяется некоторым количеством феромона. На участок помещается А муравьев. Так как все участки одинаковые, то размеры фрагмента можно вычислить по формуле:

$$m = (X_{max} - X_{min}) / n. \quad (11)$$

Таким образом, множество участков представлено матрицей $A=(I_{i,j})_{i=q,j=1}^{n,n}$. Муравей в участке $I_{i,j}$ оценивает все смежные с ним участки и рассчитывает вероятности перехода по формуле:

$$P_{ij,k}(t)=\begin{cases}\forall f(x_{i,j},y_{i,j})>f(x_{i+1,j+1},y_{i+1,j+1})\to Q^*;\\ \forall f(x_{i,j},y_{i,j})\le f(x_{i+1,j+1},y_{i+1,j+1})\to 0,\end{cases} \quad (12)$$

где $Q^*(\tau_{i+1,j+1},\tau_{i,j},\eta_{i+1,j+1},\eta_{i,j},\alpha,\beta,t)$ — функция количества феромонов в ячейках — $\tau_{i+1,j+1},\tau_{i,j}$; $\eta_{i+1,j+1},\eta_{i,j}=|f(x_{i,j},y_{i,j})-f(x_{i+1,j+1},y_{i+1,j+1})|^{-1}$ — вес (виртуальная дистанция) между двумя участками; α — изменяемый коэффициент воздействия феромона; β — изменяемый коэффициент весового воздействия; t — номер итерации.

Структура функции $Q(\tau_{i+1,j+1},\tau_{i,j},\eta_{i+1,j+1},\eta_{i,j},\alpha,\beta,t)$ может быть различной [39].

Модель (12) дополняется моделью обновления феромона (13). На каждой итерации происходит прирост и испарение феромона. Таким образом, приращение количества феромона за шаг моделирования в участке $I_{i,j}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\rho)\times\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij}(t) \quad .(13)$$

Здесь $\rho\in(0;1)$ — коэффициент испарения; $\tau_{ij}(t)$ — содержание феромона на участке $I_{i,j}$; $\Delta\tau_{ij}(t)$ — приращение на каждой итерации, рассчитываемое по формуле:

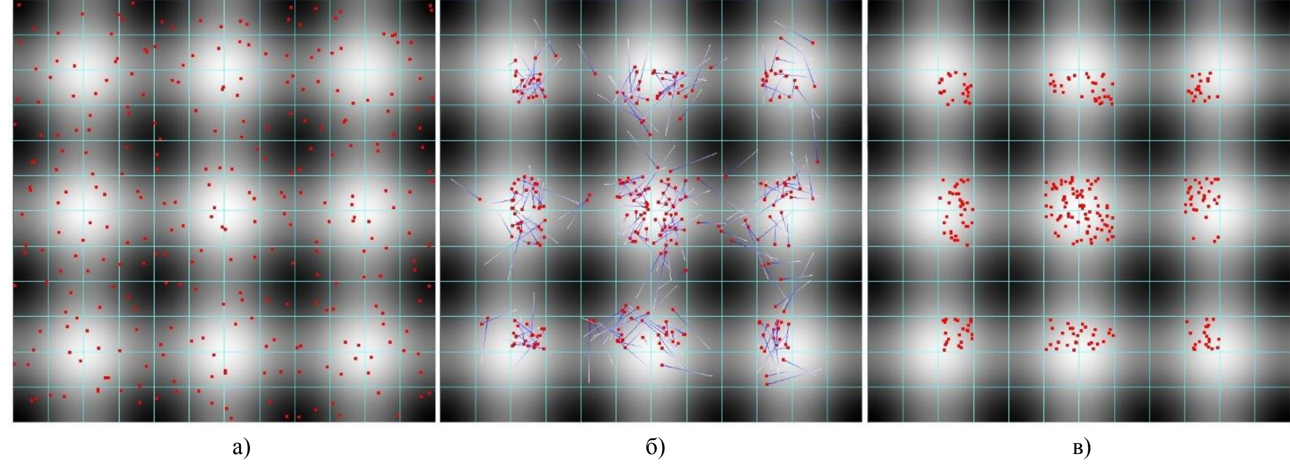
$$\Delta\tau_{ij}(t)=\sum_{p=1}^{q}(K\times(f(x_{i,j},y_{i,j})^{(k_p)}>f(x_{i+1,j+1},y_{i+1,j+1})^{(k_p)})), \quad (14)$$

где K — коэффициент прироста феромона.

Испарение происходит в связи с тем, чтобы было рассмотрено все пространство возможных решений.

При $f(x,y)_{i+1,j+1}>f(x,y)_{i,j}$ переход на участок $I_{i+1,j+1}$ с участка $I_{i,j}$ запрещен. Таким образом, условие останова считается выполненным, если все муравьи не имеют возможности двигаться. В результате через N итераций муравьи займут ячейки с наименьшим значением функции, локализовав минимумы.

На основе описанного алгоритма и моделей (12, 13) разработано ПС, реализующее поиск локальных и глобальных экстремумов. В качестве примера на рис. 5 приводятся результаты поиска глобального и локальных минимумов ФР. Для решения выбраны границы области определения ФР, аналогичные принятым в предыдущих разделах. Выделенная область изначально делилась с шагом 0,25, и в каждом фрагменте помещалось по 2 муравья. Коэффициенты $\alpha = 1$, $\beta = 0{,}5$, $\rho = 0{,}5$, $K = 1$ и $\tau = 1$. На рис. 5 изображены отдельные этапы работы ПС.

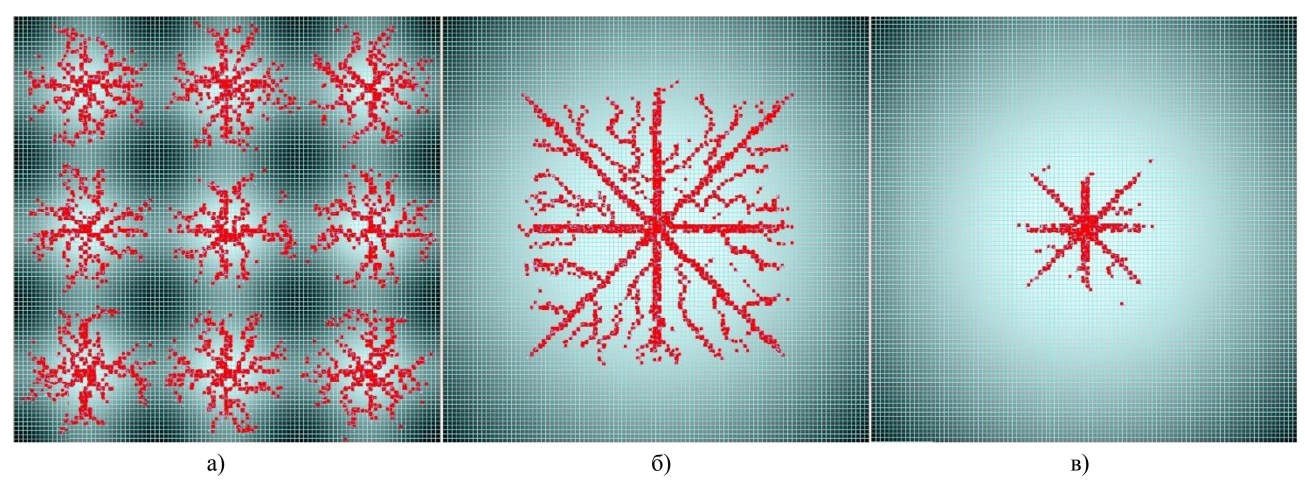


а) б) в)

Рис. 5. Визуализация этапов работы ПС: инициализация (а); 3-я итерация (б); финальный результат (в)

Уже после трех итераций наблюдается повышение концентрации агентов во всех областях минимумов функции. Финальный результат получен за 6 итераций. На рис. 5, в видно, что агенты не только обнаруживают все минимумы, но и выделяют их значимость своим количеством.

Рассмотрим пример применения алгоритма с бóльшим разбиением исследуемой области. Данный алгоритм применяется повторно к локализованным участкам до тех пор, пока не будет получен результат с заданной точностью. На рис. 6 отображены полученные за 220 итераций результаты локализации и двух уточнений глобального экстремума с разбиением 100×100 участков, который располагается в точке (0, 0). Такой результат получен в связи с исходными данными и особенностями строения ФР.



а) б) в)

Рис. 6. Результаты локализации и уточнения при разбиении области 100×100: выделение всех локальных экстремумов (а); выделение наилучшего локального экстремума (б); уточнение глобального экстремума (в)

В заключение стоит отметить, что при относительно малом количестве итераций МА дает прекрасные результаты, что свидетельствует о его эффективности при МЭ оптимизации функций.

Заключение. Для исследования эффективности решения задачи оптимизации при многоэкстремальности объекта были выбраны три эвристических алгоритма. Анализ результатов их использования показал, что данные методы действенны и эффективны, хотя есть существенные различия между структурами процессов поиска и между формами оценки получаемых результатов. Эти свойства алгоритмов определяются в каждом конкретном случае специфическими подходами к решению задачи: обнаружение и идентификация локальных экстремумов, способы кластеризации и последующие операции уточнения результатов. Тем не менее, во всех случаях оказалось необходимым подвергнуть каждый из этих методов существенной модификации, связанной с необходимостью кластеризации данных. Исследования показали, что каждый метод может обеспечить практически любую требуемую точность решения экстремальной задачи (наилучший результат: МРЧ = 1,94E-06; ЭГА = 5E-06; МА = 3,75E-07). Это, конечно, обусловливает значительное увеличение вычислительных и временных ресурсов. Однако применительно к исследуемой тестовой функции все методы показали вполне приемлемую производительность (средние затраты времени на эксперимент: МРЧ ≈ 300 с; ЭГА ≈ 86 с; МА ≈ 128 с). Таким образом, все три исследованных в данной работе метода актуальны и перспективны. Конкретный выбор алгоритмического инструмента для решения той или иной МЭ задачи зависит от опыта и от личных предпочтений исследователя, а также от специфических характеристик предметной области исследования.

Библиографический список

1. Boettcher, S. Extremal Optimization: Methods derived from Co-Evolution / S. Boettcher, A.-G. Percus // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. — San Francisco, 1999. — P. 825–832.

2. Floudas, C.-A. Encyclopedia of Optimization / C. A. Floudas, P. M. Pardalos. — 2nd edition. — New York : Springer, 2009. — 4646 p.

3. Jones, K.-B. Search Engine Optimization / K.-B. Jones. — 2nd edition — Indianapolis : Wiley Publishing, 2010. — 336 p.

4. Shreves, R. Drupal Search Engine Optimization / R. Shreves. — Birmingham : Packt Publishing, 2012. — 116 p.

5. Математическая энциклопедия : в 5 т. Т. 4. / гл. ред. И. М. Виноградов. — Москва : Советская энциклопедия, 1984. — С. 135–140.

6. Strongin, R. G. Algorithms for multi-extremal mathematical programming problems employing the set of joint space-filling curves / R. G. Strongin // Journal of Global Optimization. — 1992. — Vol. 2, is. 4. — P. 357–378.

7. Нейдорф, Р. А. Перестановочный алгоритм биэкстремального решения однородной распределительной задачи / Р. А. Нейдорф, А. В. Филиппов, З. Х. Ягубов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — № 5 (56). — Т. 11. — С. 655–666.

8. Нейдорф, Р. А. Исследование свойств многоэкстремальности решения распределительных задач / Р. А. Нейдорф, А. А. Жикулин // Системный анализ, управление и обработка информации : сб. тр. 2-го Междунар. науч. семинара. — Ростов-на-Дону : ИЦ ДГТУ, 2011. — С. 377–380.

9. Нейдорф. Р. А. Методология решения многоэкстремальных задач модифицированным методом роящихся частиц / Р. А. Нейдорф, А. А. Деревянкина // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии на предприяти-

ях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства : тр. IX междунар. науч.-техн. конф. — Ростов-на-Дону : ИЦ ДГТУ, 2010. — С. 328–330.

10. Нейдорф, Р. А. Решение многоэкстремальных задач методом делящихся роев / Р. А. Нейдорф, А. А. Скляренко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 4 (47). — С. 492–499.

11. Нейдорф, Р. А. Решение задач распознавания методом роящихся частиц с делением роя / Р. А. Нейдорф, А. А. Деревянкина // Изв. ЮФУ. Техн. науки. — 2010. — № 7 (108). — С. 21–28.

12. Rastrigin, L. A. Systems of Extremal Control / L. A. Rastrigin. — Moscow : Nauka, 1974. — 316 p.

13. Eberhart, R. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory / R.-C. Eberhart, J. Kennedy // Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. — Nagoya, 1995. — P. 39–43.

14. Kennedy, J.-A. Particle Swarm Optimization / J.-A. Kennedy , R.-C. Eberhart // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. — Piscataway, 1995. — P. 1942–1948.

15. Shi, Y. A modified particle swarm optimizer / Y. Shi, R.-C. Eberhart // Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. — Piscataway, 1998. — P. 69–73.

16. Clerc, M. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space / M. Clerc, J. Kennedy // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 2002. — Vol. 6, is. 1. — P. 58–73.

17. Mendes, R. The fully informed particle swarm: simpler, maybe better / R. Mendes, J. Kennedy, J. Neves // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 2004. — Vol. 8, is. 3. — P. 204–210.

18. Нейдорф, Р. А. Параметрическая настройка алгоритма поисковой оптимизации методом роящихся частиц с использованием планирования эксперимента / Р. А. Нейдорф, И. В. Черногоров // Международный научный институт «Educatio». — 2015. — Т. 4, № 2 (9). — С. 44–49.

19. Нейдорф, Р. А. Расширение функционала метода роящихся частиц кинематической и динамической модификацией алгоритма его реализации / Р. А. Нейдорф, И. В. Черногоров // ООО "Aeterna", Сб. статей "Роль науки в развитии общества", СБ-17. - том 1, 2015. - С. 24-28.

20. Нейдорф, Р. А. Параметрическое исследование алгоритма роящихся частиц в задаче поиска глобального экстремума / Р. А. Нейдорф, И. В. Черногоров // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-28 : сб. трудов XXVIII междунар. науч. конф. : в 12 т. Т. 3 / под общ. ред. А. А. Большакова. — Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т ; Ярославль : Ярослав. гос. техн. ун-т ; Рязань : Рязанск. гос. радиотехн. ун-т. — 2015. — 108 с.

21. Fraser, A. Computer Models in Genetics / A. Fraser. — New York : McGraw-Hill, 1970. — 192 p.

22. Goldberg, D. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning / D. Goldberg. — Boston : Addison-Wesley, 1989. — 372 p.

23. Mühlenbein, H. The Parallel Genetic Algorithm as Function Optimizer / H. Mühlenbein, D. Schomisch, J. Born // Parallel Computing. — 1991. — Vol. 17. — P. 619–632.

24. Barricelli, N.-A. Esempi numerici di processi di evoluzione / N.-A. Barricelli // Methodos. —1954. — Vol. 6. — P. 45–68.

25. Boettcher S. Extremal Optimization — Heuristics via Co-Evolutionary Avalanches / S. Boettcher // Computing in Science & Engineering. — 2000.— Vol. 2, is. 6. — P. 75–82.

26. Boettcher, S. Extremal optimization of graph partitioning at the percolation threshold / S. Boettcher // Journal of Physics A: Mathematical and General. — 1999. — Vol. 32. — P. 5201–5211.

27. Нейдорф, Р. А. Метод многоэкстремального поиска с использованием эволюционно-генетического алгоритма и выборочного критерия Стьюдента / Р. А. Нейдорф, В. В. Полях // Инновационная наука. — 2015. — Т. 1, № 3. — С. 135–140.

28. Нейдорф, Р. А. Исследование многоэкстремальных зависимостей с использованием эволюционно генетического метода и одновыборочного критерия Стьюдента / Р. А. Нейдорф, В. В. Полях // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-28 : сб. трудов XXVIII междунар. науч. конф. : в 12 т. Т. 3 / под общ. ред. А. А. Большакова. — Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т ; Ярославль : Ярослав. гос. техн. ун-т ; Рязань : Рязанск. гос. радиотехн. ун-т. — 2015. — 108 с.

29. Нейдорф, Р. А. Локализация областей поиска эволюционно-генетического алгоритма при решении задач многоэкстремального характера / Р. А. Нейдорф, В. В. Полях //Наука. Технологии. Производство. — 2015. —№ 5(9). —С. 32-35.

30. Gosset, W.-S. The probable error of a mean / W.-S. Gosset // Biometrika. — 1908. — № 6 (1). — P. 1–25.

31. Lovric, M. International encyclopedia of statistical science / M. Lovric. — Berlin : Springer-Verlag, 2011. — 1671 p.

32. Кажаров, А. А. Муравьиные алгоритмы для решения транспортных задач / А. А. Кажаров, В. М. Курейчик // Теория и системы управления. — 2010. — № 1. — С. 30–43.

33. Dorigo, M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem / M. Dorigo, L.-M. Gambardella // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 1997. — Vol. 1, № 1. — P. 53–66.

34. Liu, X. An effective clustering algorithm with ant colony / X. Liu, H. Fu // Journal of Computers. — 2010. — Vol. 5, № 4. — P. 598–605.

35. Toksari, M.-D. Ant Colony Optimization for finding the global minimum / M.-D. Toksari // Applied Mathematics and Computation. — 2006. — № 176. — P. 308–316.

36. Нейдорф, Р. А. Разработка, оптимизация и анализ параметров классического муравьиного алгоритма при решении задачи коммивояжера в полно-связном графе / Р. А. Нейдорф, О. Т. Ярахмедов // Наука. Технология. Производство. — 2015. — Т. 2, № 3. — С. 18–22.

37. Нейдорф, Р. А. Статистическое исследование оптимизационных свойств решения классическим муравьиным алгоритмом задачи коммивояжера / Р. А. Нейдорф, О. Т. Ярахмедов // Международный научный институт «Educatio». — 2015. — № 4 (11). — С. 141–144.

38. Нейдорф, Р. А. Исследование возможностей оптимального решения задачи коммивояжера параметрически оптимизированным муравьиным алгоритмом / Р. А. Нейдорф, О. Т. Ярахмедов // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-28 : сб. трудов XXVIII междунар. науч. конф. : в 12 т. Т. 3 / под общ. ред. А. А. Большакова. — Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т ; Ярославль : Ярослав. гос. техн. ун-т ; Рязань : Рязанск. гос. радиотехн. ун-т. — 2015. — 108 с.

39. Apply Ant Colony Algorithm to Search All Extreme Points of Function [Электронный ресурс] / C. Y. Pang [et al.] — Режим доступа : http://www.cornell.edu/ arxiv.org/pdf/0911.3209v1.pdf (дата обращения : 17.10.15).

References

1. Boettcher, S., Percus, A.-G. Extremal Optimization: Methods derived from Co-Evolution. Proceedings of the 1999 Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO ’99), 1999, pp. 825-832.

2. Floudas, C.-A., Pardalos, P. M. Encyclopedia of Optimization, 2nd edition. New York: Springer, 2009, 4646 p.

3. Jones, K.-B. Search Engine Optimization, 2nd edition. Indianapolis: Wiley Publishing, 2010, 336 p.

4. Shreves, R. Drupal Search Engine Optimization. Birmingham: Packt Publishing, 2012, 116 p.

5. Vinogradov, I.M., ed. Matematicheskaya entsiklopediya: v 5 t. T. 4. [Mathematical encyclopedia: in 5 vol. Vol. 4.] Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1984, pp. 135–140 (in Russian).

6. Strongin, R. G. Algorithms for multi-extremal mathematical programming problems employing the set of joint space-filling curves. Journal of Global Optimization, 1992, vol. 2, iss. 4, pp. 357–378 .

7. Neydorf, R.A., Filippov, A.V., Yagubov, Z.K. Perestanovochnyy algoritm biekstremal'nogo resheniya odnorodnoy raspredelitel'noy zadachi. [Exchange algorithm of the homogeneous distribution problem biextremal solution.] Vestnik of DSTU, 2011, no. 5 (56), vol. 11, pp. 655–666 (in Russian).

8. Neydorf, R.A., Zhikulin, A.A. Issledovanie svoystv mnogoekstremal'nosti resheniya raspredelitel'nykh zadach. [Investigation of properties of distribution problem solution multiextremality.] Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii: sb. tr. 2-go Mezhdunar. nauch. seminara. [System analysis, management and information processing: Proc. 2nd Int. Sci. Seminar.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2011, pp. 377–380 (in Russian).

9. Neydorf, R.A., Derevyankina, A.A. Metodologiya resheniya mnogoekstremal'nykh zadach modifitsirovannym metodom royashchikhsya chastits. [Methodology of solving multiextremal problems by the modified particle swarm method.] Innovatsii, ekologiya i resursosberegayushchie tekhnologii na predpriyatiyakh mashinostroeniya, aviastroeniya, transporta i sel'skogo khozyaystva: tr. IX mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Innovations, ecology, and resource-saving technologies at the enterprises of mechanical engineering, aviation, transport, and agriculture: proc. IX Int. Sci.-Tech. Conf.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2010, pp. 328–330 (in Russian).

10. Neydorf, R.A., Sklyarenko, A.A. Reshenie mnogoekstremal'nykh zadach metodom delyashchikhsya roev. [The solution of multiextreme problems by the swarm sharing method.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 4 (47), pp. 492–499 (in Russian).

11. Neydorf, R.A., Derevyankina, A.A. Reshenie zadach raspoznavaniya metodom royashchikhsya chastits s deleniem roya. [The decision of tasks of recognition by the method of swarming particles with division of the plenty.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, 2010, no. 7 (108), pp. 21–28 (in Russian).

12. Rastrigin, L. A. Systems of Extremal Control. Moscow: Nauka, 1974, 316 p.

13. Eberhart, R., Kennedy, J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, 1995, pp. 39–43.

14. Kennedy, J., Eberhart, R.-C. Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, 1995, pp. 1942–1948.

15. Shi, Y., Eberhart, R.-C. A modified particle swarm optimizer. Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, 1998, pp. 69–73.

16. Clerc, M., Kennedy, J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, vol. 6, iss. 1, pp. 58–73.

17. Mendes, R., Kennedy, J., Neves, J. The fully informed particle swarm: simpler, maybe better. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, vol. 8, iss. 3, pp. 204–210.

18. Neydorf, R.A., Chernogorov, I.V. Parametricheskaya nastroyka algoritma poiskovoy optimizatsii metodom royashchikhsya chastits s ispol'zovaniem planirovaniya eksperimenta. [Parametric identification of search engine optimization algorithm by particle swarm method using experiment design.] International Scientific Institute “Educatio”, 2015, vol. 4, no. 2 (9), pp. 44–49 (in Russian).

19. Neydorf, R.A., Chernogorov, I.V. Rasshirenie funktsionala metoda royashchikhsya chastits kinematicheskoy i dinamicheskoy modifikatsiey algoritma ego realizatsii. [Expansion of particle swarm method functional by kinematic and dynamic modification of the algorithm of its realization.] “Aeterna” LLC, Coll. Sci. Papers “The role of science in the development of society”, Coll.-17, vol. 1, 2015, pp. 24-28 (in Russian).

20. Neydorf, R.A., Chernogorov, I.V. Parametricheskoe issledovanie algoritma royashchikhsya chastits v zadache poiska global'nogo ekstremuma. [Parametric study of the particle swarm algorithm in the global hill-climbing problem.] Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh — MMTT-28: sb. trudov XXVIII mezhdunar. nauch. konf. : v 12 t. T. 3 / pod obshch. red. A. A. Bol'shakova. — Saratov: Saratov. gos. tekhn. un-t; Yaroslavl' : Yaroslav. gos. tekhn. un-t ; Ryazan': Ryazansk. gos. radiotekhn. un-t. [Mathematical techniques in methods and technologies - MMTT-28: Proc. XXVIII Int. Sci. Conf.: in 12 vol., vol. 3; under gen. ed. A.A. Bolshakov; Saratov: Saratov State Tech. Univ.; Yaroslavl: Yaroslavl State Tech. Univ.; Ryazan: Ryazan State Radiotech. Univ.] 2015, 108 p. (in Russian).

21. Fraser, A. Computer Models in Genetics. New York: McGraw-Hill, 1970, 192 p.

22. Goldberg, D. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Boston: Addison-Wesley, 1989, 372 p.

23. Mühlenbein, H., Schomisch, D., Born, J. The Parallel Genetic Algorithm as Function Optimizer. Parallel Computing, 1991, vol. 17, iss. 6-7, pp. 619–632.

24. Barricelli, N.-A. Esempi numerici di processi di evoluzione. Methodos, 1954, vol. 6, pp. 45–68.

25. Boettcher S. Extremal Optimization — Heuristics via Co-Evolutionary Avalanches. Computing in Science & Engineering, 2000, vol. 2, iss. 6, pp. 75–82.

26. Boettcher, S. Extremal optimization of graph partitioning at the percolation threshold. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1999, vol. 32, pp. 5201–5211.

27. Neydorf, R.A., Polyakh, V.V. Metod mnogoekstremal'nogo poiska s ispol'zovaniem evolyutsionno-geneticheskogo algoritma i vyborochnogo kriteriya St'yudenta. [Method of multiextremal search using an evolutionary genetic algorithm and Student’s t-test.] Innovation Science, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 135–140 (in Russian).

28. Neydorf, R.A., Polyakh, V.V. Issledovanie mnogoekstremal'nykh zavisimostey s ispol'zovaniem evolyutsionno geneticheskogo metoda i odnovyborochnogo kriteriya St'yudenta. [Study of multiextremal dependencies using an evolutionary genetic method and one sample Student's t-test.] Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh — MMTT-28: sb. trudov XXVIII mezhdunar. nauch. konf. : v 12 t. T. 3 / pod obshch. red. A. A. Bol'shakova. — Saratov: Saratov. gos. tekhn. un-t; Yaroslavl' : Yaroslav. gos. tekhn. un-t ; Ryazan': Ryazansk. gos. radiotekhn. un-t. [Mathematical techniques in methods and technologies - MMTT-28: Proc. XXVIII Int. Sci. Conf.: in 12 vol., vol. 3; under gen. ed. A.A. Bolshakov; Saratov: Saratov State Tech. Univ.; Yaroslavl: Yaroslavl State Tech. Univ.; Ryazan: Ryazan State Radiotech. Univ.] 2015, 108 p. (in Russian).

29. Neydorf, R.A., Polyakh, V.V. Lokalizatsiya oblastey poiska evolyutsionno-geneticheskogo algoritma pri reshenii zadach mnogoekstremal'nogo kharaktera. [Localization area of search of evolutionary genetic algorithm for solving multi-extreme tasks.] Science. Technology. Production. 2015, no. 5(9). pp. 32-35 (in Russian).

30. Gosset, W.-S. The probable error of a mean. Biometrika, 1908, no. 6 (1), pp. 1–25.

31. Lovric, M. International encyclopedia of statistical science. Berlin: Springer-Verlag, 2011, 1671 p.

32. Kazharov, A.A., Kureichik, V.M. Murav'inye algoritmy dlya resheniya transportnykh zadach. [Ant colony optimization algorithms for solving transportation problems.] Journal of Computer and Systems Sciences International, 2010, vol.49, iss. 1, pp. 30–43 (in Russian).

33. Dorigo, M., Gambardella, L.-M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, vol. 1, no. 1, pp. 53–66.

34. Liu, X., Fu, X. An effective clustering algorithm with ant colony. Journal of Computers, 2010, vol. 5, no. 4, pp. 598–605.

35. Toksari, M.-D. Ant Colony Optimization for finding the global minimum. Applied Mathematics and Computation, 2006, no. 176, pp. 308–316.

36. Neydorf, R.A., Yarakhmedov, O. T. Razrabotka, optimizatsiya i analiz parametrov klassicheskogo murav'inogo algoritma pri reshenii zadachi kommivoyazhera v polno-svyaznom grafe. [Design, optimization, and analysis of parameters of classical ant algorithm for solving the travelling salesman problem.] Science. Technology. Production. 2015, no. 3 (7), pp. 18–22 (in Russian).

37. Neydorf, R.A., Yarakhmedov, O. T. Statisticheskoe issledovanie optimizatsionnykh svoystv resheniya klassicheskim murav'inym algoritmom zadachi kommivoyazhera. [Statistical analysis of optimized properties of the traveling salesman problem solution by classical ant colony algorithm.] International Scientific Institute “Educatio”, 2015, no. 4 (11), pp. 141–144 (in Russian).

38. Neydorf, R.A., Yarakhmedov, O. T. Issledovanie vozmozhnostey optimal'nogo resheniya zadachi kommivoyazhera parametricheski optimizirovannym murav'inym algoritmom. [Feasibility study of the traveling salesman problem solution by parametrically optimized ant colony algorithm.] Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh — MMTT-28: sb. trudov XXVIII mezhdunar. nauch. konf.: v 12 t. T. 3 / pod obshch. red. A. A. Bol'shakova. — Saratov: Saratov. gos. tekhn. un-t; Yaroslavl' : Yaroslav. gos. tekhn. un-t ; Ryazan': Ryazansk. gos. radiotekhn. un-t. [Mathematical techniques in methods and technologies - MMTT-28: Proc. XXVIII Int. Sci. Conf.: in 12 vol., vol. 3; under gen. ed. A.A. Bolshakov; Saratov: Saratov State Tech. Univ.; Yaroslavl: Yaroslavl State Tech. Univ.; Ryazan: Ryazan State Radiotech. Univ.] 2015, 108 p. (in Russian)

39) Pang, C.Y., et al. Apply Ant Colony Algorithm to Search All Extreme Points of Function. Available at: http://www.cornell.edu/ arxiv.org/pdf/0911.3209v1.pdf (accessed: 17.10.15).

Поступила в редакцию 21.09.2015
Сдана в редакцию 21.09.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 62-50 DOI 10.12737/16056

Структурный синтез терминальных управлений с использованием энергии ускорений *

А. А. Костоглотов[1], С. В. Лазаренко[2], А. А. Кузнецов[3], В. А. Лосев[4] **
[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[3] Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Российская Федерация
[4] Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал ДГТУ), г. Шахты, Российская Федерация

Structural synthesis of terminal control using acceleration energy ***

A. A. Kostoglotov[1], S. V. Lazarenko[2], A. A. Kuznetsov[3], V. A. Losev[4] **
[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[3] Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation
[4] Institute of Service and Business (DSTU branch), Shakhty, Russian Federation

Учет физических особенностей системы в виде ее инвариантов позволяет продвинуться в решении проблемы структурного синтеза терминальных управлений. Это достигается за счет использования энергии ускорений при формировании расширенного целевого функционала, что определяет отличия полученного результата от известных. Применение аппарата асинхронного варьирования привело к установлению необходимого и достаточного условия минимума целевого функционала. На его основе получены уравнения краевой задачи для Аппелевых динамических систем. Их конечный вид определяется целью синтеза. Развертывание этих уравнений целесообразно производить для конкретных случаев. Достоверность полученных результатов подтверждается результатами решения задачи терминального управления. Для линейных систем предлагаемый метод позволяет получить точное аналитическое решение. Синтезированное управление обеспечивает безударный режим изменения состояния динамической системы.

Ключевые слова: асинхронное варьирование, структурный синтез, терминальное управление, уравнения Аппеля, энергия ускорений.

Considerations of the system physical features in the form of its invariants allow advancing in the solution of the problem of terminal control structural synthesis. It is achieved by using the acceleration energy when forming an extended objective functional that determines the difference of the obtained result from the known ones. The application of the device of asynchronous variation has led to the establishment of the necessary and sufficient conditions for a minimum target functional. On its basis, the boundary-value problem equations for Appell dynamic systems are obtained. Their final form is determined by the synthesis purpose. The development of these equations should be performed for specific cases. The validity of the results obtained is confirmed by the results of the terminal control problem solution. For linear systems, the offered method allows obtaining the exact analytical solution. The synthesized control provides the nonimpact change mode of the dynamic system condition.

Keywords: asynchronous variation, structural synthesis, terminal control, Appell equations, acceleration energy.

Введение. Проблема структурного синтеза заключается в нахождении закона управления [1]. В настоящее время все больше внимания уделяется вопросам управления системой с заданным терминальным состоянием. Это обусловлено необходимостью решения таких актуальных задач, как прицельное торможение, разгон транспортных средств, наведение систем вооружения, летательных аппаратов, стыковка космических аппаратов, управление манипуляторами, демпфирование колебаний и т.д. [2, 3].

Существенный вклад в решение проблемы синтеза внесли работы Летова А.М. и Калмана Р.Э., что связано с формализмом Беллмана Р.Э. и Ляпунова А.М. [4, 5]. Одна из основных проблем в этом случае, как правило, заключается в выборе структуры и весовых коэффициентов оптимизирующих функционалов. Широкое применение также

* Работа выполнена по грантам РФФИ № 15-08-03798 А и № 15-38-20835 мол_а_вед.
** E-mail: kostoglotov@aaanet.ru, rh3311@mail.ru, smithaa@yandex.ru, aibolit_773@mail.ru
*** The research is done on RFFI grants nos. 15-08-03798 A and 15-38-20835 mol_a_ved.

находят метод приближенно – оптимального синтеза Кротова В.Ф. и функционала обобщенной работы Красовского А.А., но они не всегда обеспечивают требуемые показатели эффективности [5,6].

Одно из перспективных направлений развития теории управления состоит в использовании физических законов при построении процедур синтеза [6]. Конструктивные результаты из [7 - 15] получены с применением принципа Гамильтона – Остроградского, из которого следуют уравнения Лагранжа второго рода. Это позволяет учесть динамику действительного движения системы при построении расширенного функционала за счет включения в него интеграла действия.

В настоящей работе в отличие от [7 - 15] для решения задачи, которая заключается в разработке метода структурного синтеза терминальных управлений, предлагается использовать энергию ускорений для конструирования расширенного функционала. Применение к нему игольчатого варьирования Л.С. Понтрягина позволяет привести оптимизационную задачу к краевой, что не предполагает использования функции Беллмана [5, 16]. Достоверность полученных результатов подтверждается на основе математического моделирования при сравнении с терминальным управлением [2].

Постановка задачи. Согласно принципу Гаусса в каждый момент времени t динамическая система движется таким образом, что принуждению [17]

$$Z=\sum_{s=1}^{n}\frac{1}{2}m_s\left(\ddot{q}_s-\frac{Q_s}{m_s}\right)^2,\ s=\overline{1,n}\,, \tag{1}$$

соответствующие истинному пути ускорения $\ddot{q}_s$ доставляют минимум:

$$\delta Z=0, \tag{2}$$

где m_s — масса материальной точки; q_s — координата материальной точки относительно неподвижной декартовой системы координат; Q_s — равнодействующая сил, приложенных к материальной точке; n — число степеней свободы динамической системы.

Двумя точками обозначена производная по времени. Из условия минимума функции (1) следуют уравнения в форме Аппеля [17, 18]:

$$\frac{\partial G}{\partial \ddot{q}_s}=Q_s\,,\ s=\overline{1,n}\,, \tag{3}$$

где G — функция Гиббса.

Пусть динамика исследуемой системы удовлетворяет (1) и, следовательно, описывается уравнениями (3).

Требуется найти допустимые силы $Q_s\in\overline{G}_Q$, переводящие систему (3) из заданного начального состояния $(q(t_0),\dot{q}(t_0))$ в заданное конечное $(q(t_1),\dot{q}(t_1))$, соответствующую им траекторию $(q,\dot{q})\in R^2$, которые обеспечат минимум целевого функционала

$$J=\int_{t_0}^{t_1}F(q)dt\to min\,, \tag{4}$$

Где $F(q)$ знакопостоянная и непрерывная вместе с частными производными во всей области определения функция, а t_0,t_1 — соответственно время начала и окончания управляемого процесса.

Необходимое и достаточное условие минимума целевого функционала. Поиск необходимого и достаточного условия минимума целевого функционала (4) проводится методом неопределенных множителей Лагранжа. Это требует рассмотрения расширенного функционала, который учитывает особенности динамики системы в форме выражения (1):

$$J_1=J+\int_{t_0}^{t_1}\lambda Z dt\to min\,, \tag{5}$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа.

Пусть произвольная обобщенная сила определяется выражением

$$Q_s=\hat{Q}_s+\delta Q_s\,, \tag{6}$$

где $\hat{Q}_s$ — доставляющая минимум целевому функционалу обобщенная сила, а $\delta Q_s=0$ при $t\,\overline{\in}\,[\tau,\tau+\Delta t]$, $\tau\in(t_0,t_1)$ — заданная точка непрерывности функции $\hat{Q}_s$ $\Delta t\in[\tau,t_1]$ — заданный малый конечный интервал времени; $\Delta t\geq 0$.

Тогда необходимое условие минимума целевого функционала определяется неравенством

$$\Delta J_1=[\lambda Z+F]\Delta t\Big|_{t_0}^{t_1}+\sum_{s=1}^{n}\int_{t_0}^{t_1}[\lambda\delta Z+\delta' F]dt=[\lambda Z+F]\Delta t\Big|_{t_0}^{t_1}+\sum_{s=1}^{n}\int_{t_0}^{t_1}\left[\lambda\left(\frac{\partial Z}{\partial\ddot{\hat{q}}_s}\delta\ddot{q}_s\right)+V_s\delta q_s\right]dt\geq 0, \tag{7}$$

где $V_s = \dfrac{\partial F}{\partial \hat{q}_s}$ — фиктивная обобщенная сила.

Соотношения на концах траектории являются условиями трансверсальности:

$$[\lambda Z + F] = 0, \tag{8}$$

если интервал $[t_1 - t_0]$ фиксирован, или

$$\Delta t = 0, \tag{9}$$

если интервал $[t_1 - t_0]$ не фиксирован.

При $t \in [t_0, \tau]$ $Q = \hat{Q}$, поэтому $\Delta J_1 = 0$.

При $t \in [\tau, \tau + \Delta t]$ $\Delta J_1 \neq 0$ и

$$\delta Z_{t \in [\tau, \tau+\Delta t]} = \frac{\partial \sum\limits_{s=1}^{n} \frac{1}{2} m_s \left(\ddot{q}_s - \frac{Q_s}{m_s} \right)^2}{\partial \ddot{q}_s} \delta \ddot{q}_s = \sum_{s=1}^{n} \left(m_s \ddot{q}_s - Q_s \right) \delta \ddot{q}_s . \tag{10}$$

При $t \in [\tau + \Delta t, t_1]$ $\Delta J_1 \neq 0$, но произвольная сила Q_s и доставляющая минимум (4) — $\hat{Q}_s$ совпадают, значит

$$\delta Z_{t \notin [\tau, \tau+\Delta t]} = \frac{\partial \sum\limits_{s=1}^{n} \frac{1}{2} m_s \left(\ddot{q}_s - \frac{\hat{Q}_s}{m_s} \right)^2}{\partial \ddot{q}_s} \delta \ddot{q}_s = \sum_{s=1}^{n} \left(m_s \ddot{q}_s - \hat{Q}_s \right) \delta \ddot{q}_s . \tag{11}$$

Приращение подынтегральной функции целевого функционала F вычисляется следующим образом:

$$\delta' F_{t \notin [\tau, \tau+\Delta t]} = \sum_{s=1}^{n} \frac{\partial F}{\partial \hat{q}_s} \delta q_s = \sum_{s=1}^{n} \hat{V}_s \delta q_s . \tag{12}$$

Тогда условие (7) записывается так:

$$\Delta J_1 = \sum_{s=1}^{n} \int_{\tau}^{\tau+\Delta t} \left[V_s \delta q_s + \lambda \left(m_s \ddot{q}_s - Q_s \right) \delta \ddot{q}_s \right] dt + \sum_{s=1}^{n} \int_{\tau+\Delta t}^{t_1} \left[\lambda \left(m_s \ddot{q}_s - \hat{Q}_s \right) \delta \ddot{q}_s + \hat{V}_s \delta q_s \right] dt \geq 0 . \tag{13}$$

Выберем теперь другие силы $Q_{\varepsilon s} \in \overline{G}_Q$, полученные по правилу (6). Приращение функционала будет иметь аналогичный (13) вид:

$$\Delta J_{1\varepsilon} = \sum_{s=1}^{n} \int_{\tau}^{\tau+\Delta t} \left[V_{\varepsilon s} \delta q_{\varepsilon s} + \lambda \left(m_s \ddot{q}_{\varepsilon s} - Q_{\varepsilon s} \right) \delta \ddot{q}_{\varepsilon s} \right] dt + \sum_{s=1}^{n} \int_{\tau+\Delta t}^{t_1} \left[\lambda \left(m_s \ddot{q}_{\varepsilon s} - \hat{Q}_s \right) \delta \ddot{q}_{\varepsilon s} + \hat{V}_s \delta q_{\varepsilon s} \right] dt . \tag{14}$$

В силу произвольности синхронных вариаций примем условие их стыковки [9]

$\delta q_s(t) = \delta q_{\varepsilon s}(t)$, при $t = \tau$. (15)

Для траекторий q_s и $q_{\varepsilon s}$, полученных для Q_s, $Q_{\varepsilon s}$, имеем:

$$\delta^2 J = \Delta J_{1\varepsilon} - \Delta J_1 = \sum_{s=1}^{n} \int_{\tau}^{\tau+\Delta t} \left[\left(V_{\varepsilon s} - V_s \right) \delta q_s + \lambda \left(m_s \left[\ddot{q}_{\varepsilon s} - \ddot{q}_s \right] - \left[Q_{\varepsilon s} - Q_s \right] \right) \delta \ddot{q}_{\varepsilon s} \right] dt + \sum_{s=1}^{n} \int_{\tau+\Delta t}^{t_1} \lambda m_s \left(\ddot{q}_{\varepsilon s} - \ddot{q}_s \right) \delta \ddot{q}_s dt . \tag{16}$$

Положим теперь, что произвольная обобщенная сила Q_s доставляет минимум целевому функционалу. Тогда при $\lambda > 0$ $\lambda m_s \left(\ddot{q}_{\varepsilon s} - \ddot{q}_s \right) \delta \ddot{q}_s = \lambda m_s \delta \ddot{q}_s^2 \geq 0$. Поэтому необходимое и достаточное условие минимума целевого функционала $\delta^2 J \geq 0$ выполняется когда

$$\sum_{s=1}^{n} \int_{\tau}^{\tau+\Delta t} \left[\left(V_{\varepsilon s} - V_s \right) \delta q_s + \lambda \left(Q_{\varepsilon s} - Q_s \right) \delta \ddot{q}_{\varepsilon s} \right] dt \geq 0 . \tag{17}$$

Поскольку в соответствии с принципом Гаусса траектории и скорости не варьируются, то интегрирование по частям приводит к следующему выражению

$$\sum_{s=1}^{n} \int_{\tau}^{\tau+\Delta t} \left[\frac{d^2 \hat{Q}_s}{dt^2} - \lambda^{-1} \hat{V}_s \right] \delta q_s dt \geq \sum_{s=1}^{n} \int_{\tau}^{\tau+\Delta t} \left[\frac{d^2 Q_s}{dt^2} - \lambda^{-1} V_s \right] \delta q_s dt . \tag{18}$$

Значит

$$\sum_{s=1}^{n}\frac{d^2(Q_s)}{dt^2}=\lambda^{-1}\sum_{s=1}^{n}\hat{V}_s,$$
$$t=\tau,\ \hat{q}_s=\hat{q}_s(\tau),\ \dot{\hat{q}}_s=\dot{\hat{q}}_s(\tau),$$
$$t=\tau+\Delta t,\ \hat{q}_s=\hat{q}_s(\tau+\Delta t),\ \dot{\hat{q}}_s=\dot{\hat{q}}_s(\tau+\Delta t). \quad (19)$$

Развертывание этого уравнения целесообразно производить для конкретных случаев задач структурного синтеза.

Структурный синтез терминальной системы управления. Пусть $n=1$ и функция Гиббса имеет вид

$$G=\frac{1}{2}\ddot{q}^2, \quad (20)$$

тогда уравнения Аппеля записываются в следующей форме:

$$\ddot{q}=U,$$
$$t_0=0, q(t_0)=-1,\ \dot{q}(t_0)=0, \quad (21)$$

где U — управляющие силы.

Требуется синтезировать в аналитическом виде закон оптимального управления динамической системой (21), переводящий ее из начального состояния в состояние покоя из условия минимума целевого функционала:

$$J=\int_0^{t_1}dt\to min; \quad (22)$$

пусть $t_1=2{,}4$ с.

В соответствии с (19) и (22)

$$q^{IV}=0. \quad (23)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$q=\frac{At^3}{6}+\frac{Bt^2}{2}+Ct+D;\dot{q}=\frac{At^2}{2}+Bt+C;U=At+B. \quad (24)$$

Постоянные интегрирования определяются из краевых условий:

$$A=-t_1^{-3}\left[12\left(q(t_1)-q(0)-\dot{q}(0)t_1\right)-6t_1\left(\dot{q}(t_1)-\dot{q}(0)\right)\right];$$
$$B=t_1^{-2}\left[6\left(q(t_1)-q(0)-\dot{q}(0)t_1\right)-2t_1\left(\dot{q}(t_1)-\dot{q}(0)\right)\right];$$
$$C=\dot{q}(0);\ D=q(0). \quad (25)$$

Исключение времени t_1 из (24) позволяет получить структуру закона управления как функции обобщенных координат

$$U=\frac{6A^2(q-D)+\left(6ABC-2B^3\right)}{2A(\dot{q}-C)-\left(2B^2-6AC\right)}. \quad (26)$$

Оценка эффективности предлагаемого решения проводится на основе сравнения с законом «мягкого» терминального управления [2]

$$U=\frac{12\left(q(t_1)-q(t)\right)}{(t_1-t)^2}-\frac{6\dot{q}(t_1)-6\dot{q}(t)}{t_1-t}. \quad (27)$$

Такое решение имеет особенность в конечный момент времени. В результате при приближении к конечному состоянию системы наблюдается эффект резкого увеличения равнодействующей сил Q. Данное обстоятельство хорошо изучено и для борьбы с ним разработаны различные приемы устранения такой особенности [2, 19].

Результаты математического моделирования приведены на рисунках 1, 2. Здесь сплошной линией обозначены кривые, полученные с использованием (26), а пунктирной на основе (27).

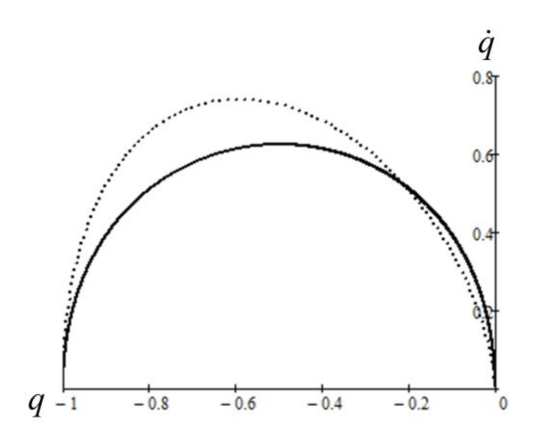


Рис. 1. Фазовый портрет

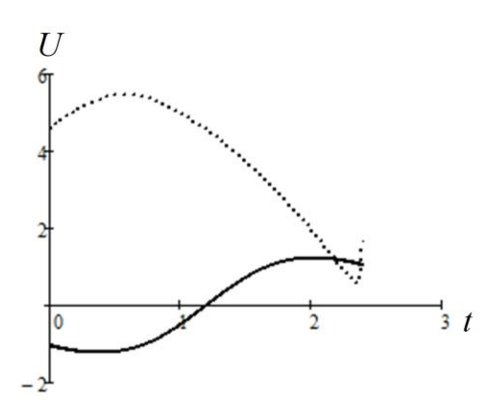


Рис. 2. Управляющие силы

Выводы. Получено новое необходимое и достаточное условие минимума целевого функционала, которое позволяет сводить задачу оптимального управления к краевой задаче для Аппелевой динамической системы. Его использование в случае линейной системы приводит к точному аналитическому решению. Это дает возможность выбора параметров регулирующего устройства. Результаты математического моделирования позволяют утверждать, что метод структурного синтеза терминальных управлений обеспечивает безударный режим изменения состояния динамической системы с минимальным объемом энергетических затрат в сравнении с решением из [2].

Библиографический список

1. Бойчук, Л. М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления / Л. М. Бойчук. — Москва : Энергия, 1971. — 112 с.

2. Разоренов, Г. Н. Метод синтеза законов «мягкого» и «сверхмягкого» управления конечным состоянием динамических систем / Г. Н. Разоренов // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2013. — № 1. — С. 3–17.

3. Карнаухов, Н. Ф. Демпфирование колебаний захватного устройства промышленного робота в режиме двухтактного динамического торможения асинхронного двигателя при частотном управлении / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Ю. В. Пудова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2009. — Т. 9, № 2. — С. 308–321.

4. Isidori, A. Nonlinear Control Systems / A. Isidori. — New York: Spinger — Verlag, 1999. — 297 p.

5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — Москва : Наука, 1987. — 712 с.

6. Новые концепции общей теории управления : сборник научных трудов / Под ред. А. А. Красовского. — Москва-Таганрог : ТРТУ, 1995. — 183 с.

7. Kostoglotov, A. A. Joint Maximum Principle in the Problem of Synthesizing an Optimal Control of Nonlinear Systems / A. A. Kostoglotov, A. I. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Automatic Control and Computer Sciences. — 2007. — No 5. — Pp. 274–281.

8. Костоглотов, А. А. Синтез оптимальных по быстродействию систем на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов, А. И. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2007. — №12. — С. 34–40.

9. Kostoglotov, A. A. The Combined-Maximum Principle in Problems of Estimating the Motion Parameters of a Maneuvering Aircraft / A. A. Kostoglotov, A. I. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2009. — Vol. 54, No 4. — Pp. 431–438.

10. Синтез оптимального управления на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо — Кавказский регион. Технические науки. — 2010. — №2. — С. 31–37.

11. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником на основе объединенного принципа максимума / Д. С. Андрашитов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо - Кавказский регион. Технические науки. — 2010. — №3. — С. 9–14.

12. Костоглотов А. А. Объединенный принцип максимума в информационных технологиях анализа и синтеза / А. А. Костоглотов, А. И. Костоглотов, С. В. Лазаренко. — Ростов-на-Дону : РАСЮРГУЭС, 2010. — 165 с.

13. Многопараметрическая идентификация конструктивных параметров методом объединенного принципа максимума [Электронный ресурс] / А. А. Костоглотов, А. И. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Инженерный вестник Дона. — 2011. — №1. — Режим доступа: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/348 (дата обращения : 14.07.15 г).

14. Костоглотов, А. А. Метод структурно-параметрической идентификации Лагранжевых динамических систем в задачах обработки измерительной информации / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Измерительная техника. — 2014. — №2. — С. 32–36.

15. Универсальный метод синтеза оптимальных управлений нелинейными динамическими системами [Электронный ресурс] / Д. С. Андрашитов [и др.] // Инженерный вестник Дона. — 2014. — №1 — Режим доступа : http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2251 (дата обращения : 14.07.15).

16. Мартыненко, Ю. Г. Управление движением мобильных колесных роботов / Ю. Г. Мартыненко // Фундаментальная и прикладная математика. — 2005. — Т. 11, № 8. — С. 29–80.

17. Новоселов, В. С. Вариационные методы в механике / В. С. Новоселов. — Санкт-Петербург: Изд-во Ленинградского университета, 1966. — 73 с.

18. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. — Москва : ГИФМЛ, 1961. — 824 с.

19. Батенко, А. П. Управление конечным состоянием движущихся объектов / А. П. Батенко. — Москва : Сов. радио, 1977. — 256 с.

References

1. Boychuk, L.M. Metod strukturnogo sinteza nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya. [Method of structural synthesis of nonlinear systems of automatic control.] Moscow: Energiya, 1971, 112 p. (in Russian).

2. Razorenov, G.N. Metod sinteza zakonov «myagkogo» i «sverkhmyagkogo» upravleniya konechnym sostoyaniem dinamicheskikh system. [A method for synthesis of “soft” and “super-soft” control laws for final states of dynamic systems.] Journal of Computer and Systems Sciences International, 2013, no. 1, pp. 3–17 (in Russian).

3. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Pudova, Y.V. Dempfirovanie kolebaniy zakhvatnogo ustroystva promyshlennogo robota v rezhime dvukhtaktnogo dinamicheskogo tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya pri chastotnom upravlenii. [Damping of the vibrations of a gripping device of an industrial robot in a regime of a two currents dynamic slowdown of an asynchronous motor with frequency control.] Vestnik of DSTU, 2009, vol. 9, no. 2, pp. 308–321 (in Russian).

4. Isidori, A. Nonlinear Control Systems. New York: Spinger — Verlag, 1999, 297 p.

5. Krasovskiy, A.A., ed. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. [Reference book on automatic control theory.] Moscow: Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).

6. Krasovskiy, A.A., ed. Novye kontseptsii obshchey teorii upravleniya: cbornik nauchnykh trudov. [New concepts of general control theory: Coll. of Sci. Papers.] Moscow -Taganrog: TRTU, 1995, 183 p. (in Russian).

7. Kostoglotov, A.A., Kostoglotov, A.I., Lazarenko, S.V. Joint Maximum Principle in the Problem of Synthesizing an Optimal Control of Nonlinear Systems. Automatic Control and Computer Sciences, 2007, vol. 41, no 5, pp. 274–281.

8. Kostoglotov, A.A., Kostoglotov, A.I., Lazarenko, S.V. Sintez optimal'nykh po bystrodeystviyu sistem na osnove ob"edinennogo printsipa maksimuma. [Synthesis of time optimal systems based on the combined maximum principle.] Information-measuring and Control Systems, 2007, no. 12, pp. 34–40 (in Russian).

9. Kostoglotov, A.A., Kostoglotov, A.I., Lazarenko, S.V. The Combined-Maximum Principle in Problems of Estimating the Motion Parameters of a Maneuvering Aircraft. Journal of Communications Technology and Electronics, 2009, vol. 54, no. 4, pp. 431–438.

10. Kostoglotov, A.A., et al. Sintez optimal'nogo upravleniya na osnove ob"edinennogo printsipa maksimuma. [Synthesis of optimal control based on the combined maximum principle.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series. 2010, no. 2, pp. 31–37 (in Russian).

11. Andrashitov, D.S., et al. Sintez algoritma avtonomnogo upravleniya matematicheskim mayatnikom na osnove ob"edinennogo printsipa maksimuma. [Synthesis of autonomous control algorithm of mathematical pendulum based on the combined maximum principle.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series. 2010, no. 3, pp. 9–14 (in Russian).

12. Kostoglotov, A.A., Kostoglotov, A.I., Lazarenko, S.V. Ob"edinennyy printsip maksimuma v informatsionnykh tekhnologiyakh analiza i sinteza. [Combined maximum principle in information analysis and synthesis technologies.] Rostov-on-Don: RASYuRGUES, 2010, 165 p. (in Russian).

13. Kostoglotov, A.A., Kostoglotov, A.I., Lazarenko, S.V. Mnogoparametricheskaya identifikatsiya konstruktivnykh parametrov metodom ob"edinennogo printsipa maksimuma. [Multivariate identification of design parameters by the combined maximum principle.] Engineering Journal of Don, 2011, no.1. Available at: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/348 (accessed: 14.07.15) (in Russian).

14. Kostoglotov, A.A., Lazarenko, S.V. Metod strukturno-parametricheskoy identifikatsii Lagranzhevykh dinamicheskikh sistem v zadachakh obrabotki izmeritel'noy informatsii. [Structural-parametric method of Lagrange dynamical systems identification in problems of measurement information processing.] Measurement Technique, 2014, no. 2, pp. 32–36 (in Russian).

15. Andrashitov, D.S., et al. Universal'nyy metod sinteza optimal'nykh upravleniy nelineynymi dinamicheskimi sistemami. [Universal method for the optimal control synthesis of nonlinear dynamical systems.] Engineering Journal of Don, 2014, no.1. Available at: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2251 (accessed: 14.07.15) (in Russian).

16. Martynenko, Yu.G. Upravlenie dvizheniem mobil'nykh kolesnykh robotov. [Motion control of mobile wheeled robots.] Journal of Mathematical Sciences, 2005, vol. 11, no. 8, pp. 29–80 (in Russian).

17. Novoselov, V.S. Variatsionnye metody v mekhanike. [Variational methods in mechanics.] St. Petersburg: Izd-vo Leningradskogo universiteta, 1966, 73 p. (in Russian).

18. Lurye, A.I. Analiticheskaya mekhanika. [Analytic Mechanics.] Moscow: GIFML, 1961, 824 p. (in Russian).

19. Batenko, A.P. Upravlenie konechnym sostoyaniem dvizhushchikhsya ob"ektov. [Terminal control of moving objects.] Moscow: Sov. radio, 1977, 256 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 31.07.2015
Сдана в редакцию 10.08.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.7 DOI 10.12737/16054

Модель организации защищенного документооборота на базе распределенной передачи данных с аутентификацией*

В. М. Деундяк[1], С. Б. Попова[2]**

[1]Южный федеральный университет, ФГНУ НИИ «Спецвузавтоматика», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Secure document management model based on distributed data transmission with authentication***

V. M. Deundyak[1], S. B. Popova[2]**

[1]Southern Federal University, Research Institute “Spetsvuzavtomatika”, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Организация защищенного документооборота является предметом данного исследования. Его цель — повышение надежности передачи данных. Задача работы — построение надежной модели организации защищенного документооборота с аутентификацией. Для решения указанной задачи применяется метод распределенной передачи данных, который позволяет за счет использования нескольких каналов значительно уменьшить вероятность несанкционированного доступа к информации и возможности ее модификации. В качестве результата работы представлена модель организации защищенного документооборота на основе двухканального алгоритма шифрования MV 2 и базовых шифров AES и RC4. Предусмотрена замена базовых шифров и учтена потребность использования ассоциированных данных, которые должны оставаться открытыми, но быть аутентифицированными вместе с основной зашифрованной информацией. Построенная модель решает поставленную задачу, а программная реализация, разработанная на языке C++ с использованием библиотеки NTL, может быть применена на практике. Область применения полученных результатов — защита коммерческого документооборота.

The present research subject is the secure document management. Its purpose is increasing the reliability of the data transmission. The research problem is the construction of a reliable model of the secure document management with authentication. The distributed data transmission technique which allows – using multiple channels – reduce significantly the risk of the unauthorized access to the information, and the possibilities of its modification, is used to solve this problem. The research result is a secure document management model based on the dual-link MV2 cryptoalgorithm, and AES and RC4 underlying ciphers. The replacement of the basic ciphers is provided, and the need of the additional associated data which must remain open, but be authenticated with the basic encrypted information is considered. The model constructed solves the original problem, and the software implementation developed in C ++ using NTL library can be applied in practice. The application field of the results obtained is the commercial document management protection.

Ключевые слова: электронный документооборот, конфиденциальность информации, целостность, аутентификация, распределенная защита, ассоциированные данные.

Keywords: electronic document management, information confidentiality, integrity, authentication, distributed protection, associated data.

Введение и постановка задачи. В настоящее время система электронного документооборота получила широкое распространение, стремительно увеличивается объем соответствующих документов [1]. Очевидно, что растет необходимость в обеспечении их защиты, контроле их целостности. Для достижения указанных целей применяются различные криптографические методы, которые позволяют обеспечивать конфиденциальность обрабатываемых данных, а также осуществлять проверку их целостности, т. е. отслеживать факт случайного искажения или несанкционированной модификации [2].

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: vl.deundyak@gmail.com, svetyla92@mail.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

Для проверки целостности используются методы аутентификации. Следует отметить, что аутентификация актуальна не только для зашифрованных текстов, но и для открытых данных, называемых ассоциированными. Например, для заголовков сетевых пакетов, которые должны быть не зашифрованы, но аутентифицированы с передаваемой зашифрованной полезной нагрузкой [3–5]. С этой целью применяются методы передачи по распределенным закрытым или частично закрытым сетям. Поэтому особый интерес представляют методы многоканальной криптографии, использование которых позволяет разбивать защищаемую информацию на несколько частей [6–11]. Очевидно, что при отсутствии одной из частей восстановление, анализ или модификация данных невозможны. Таким образом, обеспечивается более высокий уровень защиты данных.

Итак, научный и практический интерес представляют методы распределенной передачи данных, позволяющие одновременно шифровать и аутентифицировать как зашифрованные, так и ассоциированные данные. В связи с этим актуальной задачей является создание простой, надежной и эффективной модели организации защищенного документооборота с аутентификацией. В представленной статье описана такая модель, основанная на схеме двухканального шифрования MV 2.

Необходимые сведения о схеме двухканального шифрования MV 2. Схема двухканального шифрования MV 2 разработана в [7–8].

Рассмотрим алгоритм зашифрования, представленный на рис. 1. В алгоритме используется ключ, длина которого может равняться 128, 256, 512 или 1024 битов.

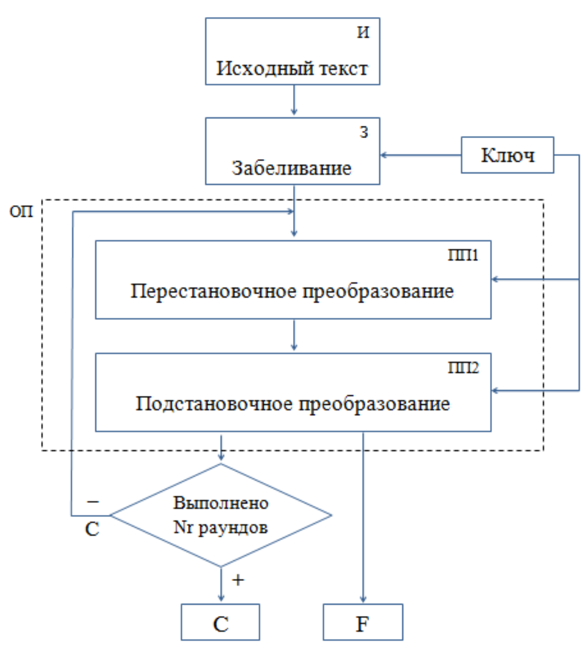


Рис. 1. Схема зашифрования алгоритма MV 2

Изначально данные, которые требуется зашифровать, подаются в блок «И» (исходный текст). Из этого блока они поступают в блок «З» (забеливание), где происходит преобразование данных — их начальная рандомизация. Для забеливания к исходному тексту применяется поточный шифр, что позволяет разрушить статистические зависимости в тексте. В качестве такого шифра используется RC4 [6]. Отметим, что при необходимости RC4 может быть заменен другим потоковым шифром с близкими параметрами.

Забеленный текст поступает на вход основного процесса (ОП) шифрования, состоящего из нескольких раундов. Всего выполняется *Nr* раундов преобразований. В каждом раунде входные данные подвергаются преобразованию: перестановочному (блок «ПП1») и подстановочному MV 2 (блок «ПП2»). В качестве перестановочного преобразования в модели используется алгоритм AES [12], который может быть заменен на другой блочный шифр с аналогичными характеристиками. Подстановочное преобразование осуществляется с использованием специальных подстановочных таблиц MV 2-преобразований, которые заменяют строки исходного текста фиксированной длины парой строк переменной меньшей длины [7]. При зашифровании остаток С, полученный на выходе блока «ПП2», отправля-

ется на вход следующего раунда преобразований в блок «ПП1». При этом с каждым раундом дополнительная информация, необходимая для обеспечения обратимости MV 2-преобразований (флаг), накапливается в F. Остаток C, полученный на последнем раунде преобразований, называется информационным ядром. Пара шифртекстов C и F образуют выход алгоритма зашифрования.

Таким образом, алгоритм зашифрования обеспечивает разбиение входной конфиденциальной информации на две части — C и F, которые подаются на вход двух открытых каналов. При расшифровании две части зашифрованного текста проходят Nr раундов обратных преобразований основного процесса (ОП). После этого снимается забеливание и тем самым восстанавливаются исходные данные.

Модель защищенного документооборота с аутентификацией. В разработанной модели зашифрованные данные передаются по двум каналам связи. При этом наряду с зашифрованием исходных данных осуществляется также и одновременная их аутентификация (рис. 2).

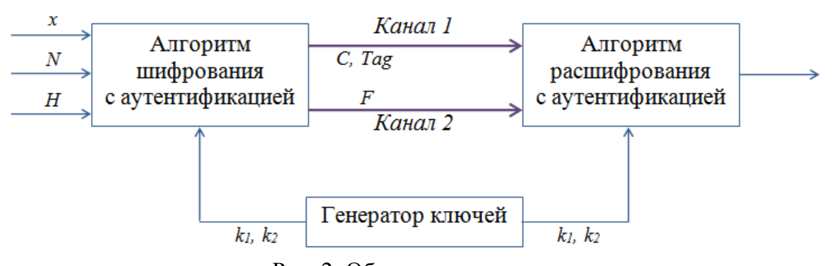


Рис. 2. Общая схема модели

Рассмотрим представленную схему более детально. На вход алгоритма зашифрования с аутентификацией поступают данные трех типов:

— x — данные для зашифрования и аутентификации;

— N — уникальный вектор из n битов, называемый нонсом, который используется один раз в течение жизни ключа;

— H — ассоциированные данные.

Кроме того, на вход алгоритма от генератора ключей поступают также следующие величины:

— k_1 — ключ длины n для алгоритмов зашифрования/расшифрования,

— k_2—ключ длины n для алгоритма аутентификации.

Данные, полученные на выходе алгоритма зашифрования с аутентификацией, отправляются по двум каналам. По первому каналу пересылается первый шифртекст C (остаток) и тег аутентификации Tag, а по второму каналу — второй шифртекст F (флаги). Алгоритм расшифрования с аутентификацией расшифровывает пришедшие по каналам шифртексты C и F. По расшифрованным данным вычисляется тег аутентификации. Аутентификация считается пройденной, если пришедший по каналу вместе с шифртекстами тег аутентификации совпадает с тегом, полученным после работы алгоритма расшифрования. При этом на выходе алгоритма расшифрования с аутентификацией будут получены исходные данные x. В противном случае в качестве результата выдается сообщение об ошибке.

Теперь рассмотрим подробнее работу входящих в схему алгоритмов зашифрования и расшифрования. Разделение на два канала осуществляется с помощью MV 2 (рис. 1). В MV 2 проводится несколько раундов преобразований. Поэтому в построенном алгоритме зашифрования с аутентификацией также выполняется несколько раундов. Следовательно, достаточно рассмотреть работу одного раунда (рис. 3), которая делится на две части — зашифрование (левая часть схемы) и аутентификация (правая часть).

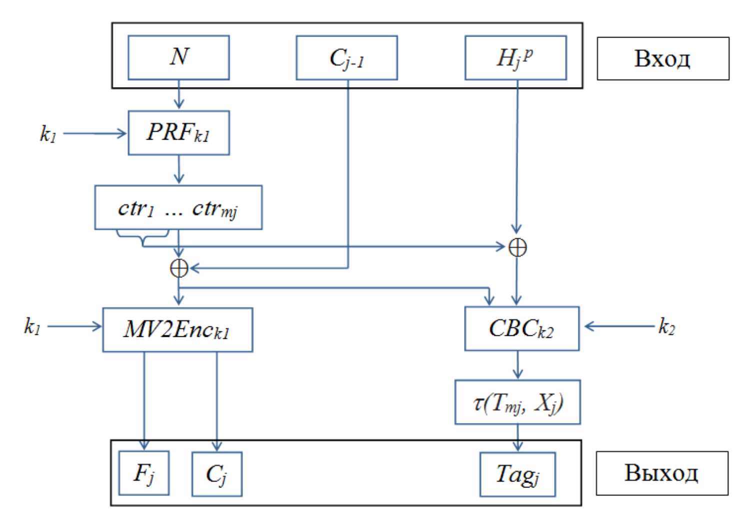


Рис. 3. Схема зашифрования с аутентификацией для j-го раунда

Перед началом зашифрования из n-битного ключа k_1 генерируется 32 вспомогательных ключа по 256 байтов. Предположим, что $n = 128$. Эти ключи представляют собой 32 таблицы подстановочного преобразования [7]. В начале каждого раунда алгоритма MV 2 случайным образом происходит выбор номера таблицы. Обозначим через N_j номер таблицы MV 2-преобразования на j-м раунде:

$$j \in [1, Nr],$$

где Nr — число раундов алгоритма MV 2.

Поступающее на вход раунда зашифрования сообщение C_{j-1} разбивается на блоки, размер которых равен n битов. Если размер последнего блока меньше n, он дополняется до n битов. Для первого раунда $C_0 = x$. Нонс N изначально зашифровывается с помощью псевдослучайной функции на ключе k_1:

$$ctr_1 = PRF_{k1}(N).$$

Из полученного значения ctr_1 вычисляется набор счетчиков:

$$ctr_i = PRF_{k1}(ctr_1 + i - 1),$$

где $i \in [2, m_j]$.

Счетчики суммируются по модулю 2 с зашифровываемым на данном раунде текстом C_{j-1}:

$$S_i = ctr_{i+1} \oplus C_{j-1i},$$

где C_{j-1i} — i-й блок C_{j-1}.

Для получения остатка и флага на j-м раунде к S_i алгоритм MV 2 применяется следующим образом:

$$(c_i, f_i) = MV\,2Enc_{k1}(S_i),$$

где c_i и f_i — соответственно остаток и флаг для i-го блока сообщения C_{j-1i}.

Остаток на j-м раунде C_j получается путем битовой конкатенации значений c_i, а флаг F_j — с помощью битовой конкатенации флагов f_i, $i \in [1, m_j]$, где m_j — число n-битных блоков в C_{j-1}. Остаток C_j отправляется на вход следующего раунда для последующего сжатия, а флаги F_j с каждого раунда накапливаются. В итоге после Nr раундов преобразований получается пара

$$C = C_{Nr},\ F = F_{Nr} \ldots F_1.$$

На этом этапе завершается зашифрование данных.

Проверка целостности осуществляется с помощью кодов аутентификации сообщения. При выработке тега аутентификации для j-го раунда используется режим работы CBC некоторого блочного шифра [13]. На основе этого режима строится последовательность действий, в которой каждый новый зашифрованный блок зависит от результата зашифрования предыдущего. Такая связь дает возможность получить тег аутентификации сообщения, поскольку изменение даже одного бита открытого текста влечет за собой непредсказуемое изменение выходного зашифрованного блока. В качестве блочного шифра для выработки тега аутентификации выбран блочный шифр AES [12].

Опишем процесс получения тега. До начала применения AES необходимо произвести следующие вычисления. Положим $q = |H| / Nr$ и вычислим

$$H_j^p = (0^1, 0^2, \ldots, 0^{p-1}, H^{(j-1)q}, H^{(j-1)q+1}, \ldots, H^{jq-1}, 0^{p+q}, \ldots, 0^n),$$

где 0^i означает, что i-й бит строки H_j^p равен 0; H^k — k-й бит H; p — сумма номеров таблиц MV 2-преобразований, выбранных для j раундов.

Рассмотрим j-й раунд работы схемы. Значение $T_1 = Ctr_1 \oplus H_j^p$ служит начальным значением счетчика для шифрования в режиме CBC:

$$T_i = E_{k\,2}\,(T_{i-1} \oplus S_{i-1}),\ i \in [2,\ m_j],$$

где $E_{k\,2}$ — алгоритм зашифрования AES на ключе k_2.

Вычисляются

$$X_j = N_j \cdot Z_{Nj} \pmod{256},$$

где $N_j \in [0, 31]$, $Z_{N\,j}$ — N_j-й символ в N_j-й таблице MV 2-преобразования

и раундовый тег

$$Tag_j = \tau(T_{mj},\ X_j),$$

где τ означает циклический сдвиг T_{mj} на 4 бита вправо, когда X_j четное, и аналогичный сдвиг влево, когда X_j нечетное.

После выполнения Nr раундов результирующий тег Tag вычисляется путем сложения по модулю 2 всех раундовых тегов:

$$Tag = Tag_1 \oplus Tag_2 \oplus \ldots \oplus Tag_{Nr}.$$

Таким образом, выход схемы шифрования с аутентификацией является тройкой (C, F, Tag). По одному каналу отправляется пара (C, Tag), по другому — F.

Алгоритм расшифрования с аутентификацией для проверки аутентичности сообщения сначала расшифровывает пришедшие по каналу шифртексты C и F. Затем с помощью расшифрованных значений на каждом раунде по такому же принципу, как в схеме шифрования с аутентификацией, вычисляет раундовые теги, а затем, после выполнения всех раундов вычисляет результирующий тег. Если пришедший по каналу тег аутентификации совпадает с тегом, вычисленным после расшифровки шифртекстов, то проверка целостности выполнена, и выходом алгоритма расшифрования с аутентификацией является исходный текст x. Если же теги не совпали, то алгоритм выдает сообщение об ошибке.

Описанная выше модель программно реализована на языке *C*++ с использованием библиотеки NTL [14]. Приведем пример входных и выходных данных, полученных в результате работы программы.

Входные данные: открытый текст X, нонс N, ассоциированные данные H, ключи k_1 и k_2:

X = [Погасло дневное светило;
На море синее вечерний пал туман.
Шуми, шуми, послушное ветрило,
Волнуйся подо мной, угрюмый океан.]

N = [0×11, 0×01, 0×22, 0×13, 0×04, 0×67, 0×06, 0×17, 0×08, 0×29, 0×0a, 0×61, 0×1c, 0×0d, 0×0e, 0×0*f*];

H = [0×75, 0×11, 0×02, 0×03, 0×07, 0×20, 0×06, 0×16, 0×18, 0×09, 0×0a, 0×0b, 0×0c, 0×23, 0×01, 0×11];

k_1 = [0×9e, 0×47, 0×31, 0×c5, 0×49, 0×ff, 0×58, 0×41, 0×3f, 0×7d, 0×89, 0×e3, 0×11, 0×fb, 0×89, 0×13];

k_2 = [0×15, 0×11, 0×42, 0×30, 0×44, 0×05, 0×06, 0×07, 0×27, 0×19, 0×2a, 0×0b, 0×0c, 0×0d, 0×0e, 0×1*f*].

Выходные данные: шифртексты C и F, тег аутентификации Tag:

C = [±$wДўЗЖ~¶Ђns€6qI{Л@–Н€z¬33шэ*0©|_BYµ)
{•zJ§/}§нњMHџBHg~9†Ў6M–WPAI©mшђ!‘Є±#юSЌзhФkя`Ц];

F = [AЬ-©W qR·AeQBM•КСэdЖЬHoIk"пa];

Tag = [“□„™v\OЪMZDй□ШM№].

Заключение. Для организации защищенного документооборота построена модель, обеспечивающая конфиденциальность и целостность обрабатываемых данных. Модель основана на принципах распределенной передачи данных и использования дополнительных ассоциированных данных. Представленная модель программно реализована на языке C++ с использованием библиотеки NTL. Приведены результаты работы программы для тестовых входных данных.

Авторы выражают искреннюю признательность А. Э. Маевскому за полезное обсуждение постановки задачи.

Библиографический список

1. Саттон, М.-Дж.-Д. Корпоративный документооборот: принципы, технологии, методология внедрения / М.-Дж.-Д. Саттон. — Санкт-Петербург : Азбука, 2002. — 448 с.

2. Бабаш, А. В. Криптография / А. В. Бабаш, Г. Р. Шанкин. — Москва : СОЛОН-Р, 2002. — 512 с.

3. Rogaway, P. Evaluation of Some Blockcipher Modes of Operation [Электронный ресурс] / P. Rogaway. — Режим доступа: http://web.cs.ucdavis.edu/~rogaway/papers/modes.pdf (дата обращения 01.06.15).

4. Bellare, M. Authenticated encryption: Relations among notions and analysis of the generic composition paradigm / M. Bellare, C. Namprempre // Lecture Notes in Computer Science. — 2000. — Vol. 1976 : Advances in Cryptology — ASIACRYPT 2000 / ed. T. Okamoto. — Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2000. — P. 531–545.

5. Rogaway, P. Authenticated-encryption with associated-data / P. Rogaway // ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS'02). — Washington, 2002. — P. 98–107.

6. Шнайер, Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си / Б. Шнайер. — Москва : Триумф, 2002. — 816 с.

7. Мищенко, В. А. Ущербные тексты и многоканальная криптография / В. А. Мищенко, Ю. В. Виланский. — Минск : Энциклопедикс, 2007. — 292 с.

8. Мищенко, В. А. Криптографический алгоритм MV 2 / В. А. Мищенко, Ю. В. Виланский, В. В. Лепин. — Минск : Энциклопедикс, 2007. — 176 с.

9. Деундяк, В. М. О стойкости кодового зашумления к статистическому анализу наблюдаемых данных многократного повторения / В. М. Деундяк, Ю. В. Косолапов // Моделирование и анализ информационных систем. — 2012. — Т. 19, № 4. — С. 110–127.

10. Могилевская, Н. С. Программное средство логической проверки корректности криптографических протоколов распределения ключей на основе BAN-логики / Н. С. Могилевская // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — Т. 12, № 1, вып. 2. — С. 5–15.

11. Могилевская, Н. С. Пороговое разделение файлов на основе битовых масок: идея и возможное применение / Н. С. Могилевская, Р. В. Кульбикаян, Л. А. Журавлев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011 — Т. 11, № 10. — С. 1749–1755.

12. Баричев, С. Г. Основы современной криптографии / С. Г. Баричев, В. В. Гончаров, Р. Е. Серов. — Москва : Горячая линия — Телеком, 2002. — 176 с.

13. Основы криптографии / А. П. Алферов [и др.]. — Москва : Гелиос АРВ, 2002. — 480 с.

14. NTL: A Library for doing Number Theory [Электронный ресурс] / Victor Shoup. — Режим доступа: http://www.shoup.net/ntl/ (дата обращения 01.06.15).

References

1. Satton, M.G.D. Korporativnyy dokumentooborot: printsipy, tekhnologii, metodologiya vnedreniya. [Corporate document management: principles, technologies, implementation methodology.] St. Petersburg: Azbuka, 2002, 448 p. (in Russian).

2. Babash, A.V., Shankin, G.R. Kriptografiya. [Cryptology.] Moscow: SOLON-R, 2002, 512 p. (in Russian).

3. Rogaway, P. Evaluation of Some Blockcipher Modes of Operation. Available at: http://web.cs.ucdavis.edu/~rogaway/papers/modes.pdf (accessed: 01.06.15).

4. Bellare, M., Namprempre, C. Authenticated encryption: Relations among notions and analysis of the generic composition paradigm. Lecture Notes in Computer Science, 2000, vol. 1976, pp. 531–545; Advances in Cryptology — ASIACRYPT 2000, Okamoto, T., ed. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

5. Rogaway, P. Authenticated-encryption with associated-data. ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS'02). Washington, 2002, pp. 98–107.

6. Shnayer, B. Prikladnaya kriptografiya. Protokoly, algoritmy, iskhodnye teksty na yazyke Si. [Applied Cryptography. Protocols, algorithms, source code in C.] Moscow: Triumf, 2002, 816 p. (in Russian).

7. Mishchenko, V.A., Vilanskiy, V.A. Ushcherbnye teksty i mnogokanal'naya kriptografiya. [Defective texts and multichannel cryptology.] Minsk: Entsiklopediks, 2007, 292 p. (in Russian).

8. Mishchenko, V.A., Vilanskiy, V.A., Lepin, V.V. Kriptograficheskiy algoritm MV 2. [Cipher algorithm.] Minsk: Entsiklopediks, 2007, 176 p. (in Russian).

9. Deundyak, V.M., Kosolapov, Y.V. O stoykosti kodovogo zashumleniya k statisticheskomu analizu nablyudaemykh dannykh mnogokratnogo povtoreniya. [On the firmness code noising to the statistical analysis of the observable data of repeated repetition.] Modelirovanie i AnalyzInformatsionnykh Sistem, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 110–127 (in Russian).

10. Mogilevskaya, N.S. Programmnoe sredstvo logicheskoy proverki korrektnosti kriptograficheskikh protokolov raspredeleniya klyuchey na osnove BAN-logiki. [Software tool for logical validation of cryptographic key generation protocols based on BAN-logic.] Vestnik of DSTU, 2012, vol. 12, no. 1, iss. 2, pp. 5–15 (in Russian).

11. Mogilevskaya, N.S., Kulbikayan, R.V., Zhuravlev, L.A. Porogovoe razdelenie faylov na osnove bitovykh masok: ideya i vozmozhnoe primenenie. [Threshold file sharing based on bit masks: concept and possible use.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 10, pp. 1749–1755 (in Russian).

12. Barichev, S.G., Goncharov, V.V., Serov, R.E. Osnovy sovremennoy kriptografii. [Fundamentals of modern cryptology.] Moscow: Goryachaya liniya — Telekom, 2002, 176 p. (in Russian).

13. Alpherov, A.P., et al. Osnovy kriptografii. [Fundamentals of cryptology.] Moscow: Gelios ARV, 2002, 480 p. (in Russian).

14. Shoup, V. NTL: A Library for doing Number Theory. Available at: http://www.shoup.net/ntl/ (accessed: 01.06.15).

Поступила в редакцию 05.06.2015
Сдана в редакцию 10.06.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.211 DOI 10.12737/16076

О применимости формулы Байеса*

А. И. Долгов[1**]
[1]Акционерное общество «Конструкторское бюро по радиоконтролю систем управления, навигации и связи», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

On applicability of Bayes' formula***

A. I. Dolgov[1**]
[1]«Design bureau on monitoring of control, navigation and communication systems» JSC, Rostov-on-Don, Russian Federation

Предметом данного исследования является формула Байеса. Цель настоящей работы — анализ и расширение области применения формулы. Первоочередной задачей представляется изучение публикаций, посвященных указанной проблеме, позволившее выявить недостатки применения формулы Байеса, приводящие к некорректным результатам. Следующая задача — построение модификаций формулы Байеса, обеспечивающих учет различных одиночных свидетельств с получением корректных результатов. И, наконец, на примере конкретных исходных данных сравниваются некорректные результаты, получаемые с применением формулы Байеса, и корректные результаты, вычисляемые с помощью предлагаемых модификаций. При проведении исследования использованы два метода. Во-первых, проведен анализ принципов построения известных выражений, применяемых для записи формулы Байеса и ее модификаций. Во-вторых, выполнена сравнительная оценка результатов (в том числе количественная). Предлагаемые модификации обеспечивают более широкое применение формулы Байеса в теории и на практике, в том числе при решении прикладных задач.

Ключевые слова: условные вероятности, несовместные гипотезы, совместимые и несовместимые свидетельства, нормирование.

Bayes' formula is the research subject. The work objective is to analyze the formula application and widen the scope of its applicability. The first-priority problem includes the identification of the Bayes' formula disadvantages based on the study of the relevant publications leading to incorrect results. The next task is to construct the Bayes' formula modifications to provide an accounting of various single indications to obtain correct results. And finally, the incorrect results obtained with the application of Bayes' formula are compared to the correct results calculated with the use of the proposed formula modifications by the example of the specific initial data. Two methods are used in studies. First, the analysis of the principles of constructing the known expressions used to record the Bayesian formula and its modifications is conducted. Secondly, a comparative evaluation of the results (including the quantitative one) is performed. The proposed modifications provide a wider application of Bayes' formula both in theory and practice including the solution of the applied problems.

Keywords: conditional probabilities, inconsistent hypotheses, compatible and incompatible indications, normalizing.

Введение. Формула Байеса находит все более широкое применение в теории и практике [1–10], в том числе при решении прикладных задач с помощью вычислительной техники [5 и 6]. Использование взаимно независимых вычислительных процедур позволяет особенно эффективно применять данную формулу при решении задач на многопроцессорных вычислительных системах [9], так как в этом случае параллельная реализация выполняется на уровне общей схемы, и при добавлении очередного алгоритма или класса задач нет необходимости повторно проводить работу по распараллеливанию.

Предметом данного исследования является применимость формулы Байеса для сравнительной оценки апостериорных условных вероятностей несовместных гипотез при различных одиночных свидетельствах. Как показывает анализ, в таких случаях сравниваются нормированные вероятности несовместных комбинированных событий, принадле-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: dolgov-ai@yandex.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

жащих разным полным группам событий [7–9]. При этом сравниваемые результаты оказываются неадекватными реальным статистическим данным. Это обусловлено следующими факторами:
— используется некорректное нормирование [10];
— не принимается во внимание наличие или отсутствие пересечений учитываемых свидетельств.

С целью устранения обнаруженных недостатков выявляются случаи применимости формулы Байеса. Если же указанная формула неприменима, решается задача построения ее модификации, обеспечивающей учет различных одиночных свидетельств с получением корректных результатов. На примере конкретных исходных данных выполнена сравнительная оценка результатов:
— некорректных — получаемых с использованием формулы Байеса;
— корректных — вычисляемых с помощью предлагаемой модификации.

Исходные положения. В основу излагаемых далее утверждений положим принцип сохранения отношений вероятностей: «Корректная обработка вероятностей событий осуществима лишь при нормировании с применением одного общего нормирующего делителя, обеспечивающего равенство отношений нормированных вероятностей отношениям соответствующих им нормируемых вероятностей» [10]. Данный принцип представляет субъективную основу теории вероятностей, однако не отражается должным образом в современной учебной и научно-технической литературе.

При нарушении указанного принципа искажаются сведения о степени возможности рассматриваемых событий. Получаемые на основе искаженных сведений результаты и принимаемые решения оказываются неадекватными реальным статистическим данным.

В предлагаемой статье будут использованы следующие понятия:
— элементарное событие — событие, не делимое на элементы;
— комбинированное событие — событие, представляющее то или иное сочетание элементарных событий;
— совместимые события — события, которые в одних случаях сравнительной оценки их вероятностей могут быть несовместными, а других случаях совместными;
— несовместимые события — события, которые во всех случаях являются несовместными.

В качестве элементарных событий далее будут рассматриваться подтверждаемые гипотезы и свидетельства, а в качестве комбинированных — только произведения элементарных событий.

Согласно теореме умножения вероятностей, вероятность $P(H_k E)$ произведения элементарных событий H_k и E вычисляется в виде произведения вероятностей $P(H_k E) = P(E)P(H_k|E)$ [2]. В связи с этим формула Байеса часто записывается в виде $P(H_k|E) = \dfrac{P(H_k E)}{P(E)}$, описывающем определение апостериорных условных вероятностей $P(H_k|E)$ гипотез H_k $(k = 1,\dots,n)$ на основе нормирования априорных вероятностей $P(H_k E)$ учитываемых комбинированных несовместимых событий $H_k E$. Каждое из таких событий представляет произведение, сомножителями которого являются одна из рассматриваемых гипотез и одно учитываемое свидетельство. При этом все рассматриваемые события $H_k E$ $(k = 1,\dots,n)$ образуют полную группу $\bigcup_{k=1}^{n} H_k E$ несовместимых комбинированных событий, в связи с чем их вероятности $P(H_k E)$ должны быть нормированы с учетом формулы полной вероятности [2], согласно которой $P(E) = \sum_{k=1}^{n} P(H_k) P(E|H_k)$. Поэтому формула Байеса чаще всего записывается в наиболее употребляемом виде:

$$P(H_k|E) = \frac{P(H_k)\,P(E|H_k)}{\sum_{k=1}^{n} P(H_k)\,P(E|H_k)}. \quad (1)$$

Далее измененная формула, в которой учитывается более чем одно свидетельство, будет называться модификацией формулы Байеса.

Анализ особенностей построения формулы Байеса, нацеленного на решение прикладных задач, а также примеры ее практического применения позволяют сделать важный вывод относительно выбора полной группы сравниваемых по степени возможности комбинированных событий (каждое из которых является произведением двух элементарных событий — одной из гипотез и учитываемого свидетельства). Такой выбор осуществляется субъективно лицом, принимающим решение, на основе объективных исходных данных, присущих типовым условиям обстановки: виды и количество оцениваемых гипотез и конкретно учитываемое свидетельство.

Несравниваемые вероятности гипотез при одиночных несовместимых свидетельствах. Формула Байеса традиционно применяется в случае определения не сравниваемых по степени возможности апостериорных условных веро-

ятностей гипотез H_k при одиночных несовместимых свидетельствах E_i, каждое из которых может «появиться только в комбинации с какой-либо из этих гипотез» [2]. При этом выбираются полные группы $\bigcup_{k=1}^{n} H_k E_i$ комбинированных событий в виде произведений, сомножителями которых являются одно из свидетельств E_i (i=1,…,m) и одна из n рассматриваемых гипотез.

Формула Байеса применяется для сравнительной оценки вероятностей комбинированных событий каждой такой полной группы, отличающейся от других полных групп не только учитываемым свидетельством E_i, но и в общем случае видами гипотез H_k и (или) их количеством n (см., например, [2])

$$P(H_k|E_i) = \frac{P(H_k)\,P(E_i|H_k)}{\sum\limits_{k=1}^{n} P(H_k)\,P(E_i|H_k)}.$$

В частном случае при n = 2

$$P(H_k|E_i) = \frac{P(H_k)P(E_i|H_k)}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k)P(E_i|H_k)}.$$

и получаемые результаты являются правильными, ввиду соблюдения принципа сохранения отношений вероятностей:

$$\frac{P(H_1|E_i)}{P(H_2|E_i)} = \frac{P(H_1)P(E_i|H_1)}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k)P(E_i|H_k)} \Bigg/ \frac{P(H_2)\,P(E_i|H_2)}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k)\,P(E_i|H_k)} = \frac{P(H_1)\,P(E_i|H_1)}{P(H_2)\,P(E_i|H_2)}.$$

Субъективность выбора полной группы сравниваемых по степени возможности комбинированных событий (с теми или иными изменяемыми элементарными событиями) позволяет выбрать полную группу событий $\bigcup_{k=1}^{n} H_k\,\overline{E}_i$ с отрицанием элементарного события $\overline{E}_i$ ([6–8]) и записать формулу Байеса (i = 1,…,m) так:

$$P(H_k|\overline{E}_i) = \frac{P(H_k)P(\overline{E}_i|H_k)}{\sum\limits_{k=1}^{n} P(H_k)P(\overline{E}_i|H_k)}.$$

Такая формула также применима и дает возможность получить правильные результаты, если вычисляемые нормированные вероятности сравниваются при различных рассматриваемых гипотезах, но не при различных свидетельствах.

Сравниваемые вероятности гипотез при одиночных несовместимых свидетельствах. Судя по известным публикациям (за исключением работ автора излагаемого материала — например, [9] и [10]), формула Байеса широко применяется для сравнительной оценки апостериорных условных вероятностей гипотез при различных одиночных свидетельствах. При этом не уделяется внимание следующему факту. В указанных случаях сравниваются нормируемые вероятности несовместных (несовместимых) комбинированных событий, принадлежащих разным полным группам событий. Однако в данном случае формула Байеса неприменима, так как сравниваются не входящие в одну полную группу комбинированные события, нормирование вероятностей которых осуществляется с использованием разных нормирующих делителей. Нормированные вероятности несовместных (несовместимых) комбинированных событий можно сравнивать только в том случае, если они принадлежат одной и той же полной группе событий и нормированы с использованием общего делителя, равного сумме вероятностей всех нормируемых событий, входящих в полную группу.

В общем случае в качестве несовместимых свидетельств могут рассматриваться:

— два свидетельства (например, свидетельство и его отрицание);

— три свидетельства (к примеру, в игровой ситуации выигрыш, проигрыш и ничья);

— четыре свидетельства (в частности, в спорте выигрыш, проигрыш, ничья и переигровка) и т. д.

Рассмотрим довольно простой пример (соответствующий примеру, приведенному в [8]) применения формулы Байеса для определения апостериорных условных вероятностей гипотезы H_k при двух несовместимых событиях в виде свидетельства A_j и его отрицания $\overline{A}_j$:

$$P(H_k | A_j) = \frac{P(H_k A_j)}{P(A_j)} = \frac{P(H_k)\ P(A_j|H_k))}{\sum_{k=1}^{n} P(H_k)\ P(A_j|H_k)}, \quad (2)$$

$$P(H_k | \overline{A}_j) = \frac{P(H_k \overline{A}_j)}{P(\overline{A}_j)} = \frac{P(H_k)\ P(\overline{A}_j|H_k)}{\sum_{k=1}^{n} P(H_k)\ P(\overline{A}_j|H_k)}. \quad (3)$$

В случаях (2) и (3) субъективно выбранными полными группами сравниваемых по степени возможности комбинированных событий являются соответственно множества $\bigcup_{k=1}^{n} H_k A_j$ и $\bigcup_{k=1}^{n} H_k \overline{A}_j$. Это тот случай, когда формула Байеса неприменима, т. к. нарушен принцип сохранения отношений вероятностей — не соблюдается равенство отношений нормированных вероятностей отношениям соответствующих им нормируемых вероятностей:

$$\frac{P(H_k | A_j)}{P(H_k | \overline{A}_j)} = \frac{P(H_k)\ P(A_j | H_k)}{\sum_{k=1}^{n} P(H_k)\ P(A_j | H_k)} \Bigg/ \frac{P(H_k)\ P(\overline{A}_j | H_k)}{\sum_{k=1}^{n} P(H_k)\ P(\overline{A}_j | H_k)} = \frac{P(H_k)\ P(A_j | H_k)}{P(H_k)\ P(\overline{A}_j | H_k)}.$$

Согласно принципу сохранения отношений вероятностей, корректная обработка вероятностей событий осуществима лишь при нормировании с применением одного общего нормирующего делителя, равного сумме всех сравниваемых нормируемых выражений. Поэтому

$$\sum_{k=1}^{n} P(H_k) P(A_j | H_k) + \sum_{k=1}^{n} P(H_k) P(\overline{A}_j | H_k) = \sum_{k=1}^{n} P(H_k)[P(A_j | H_k) + P(H_k)\ P(\overline{A}_j | H_k)] = \sum_{k=1}^{n} P(H_k) = 1.$$

Таким образом, обнаруживается тот факт, что существуют разновидности формулы Байеса, отличающиеся от известных отсутствием нормирующего делителя:

$$P(H_k | A_j) = P(H_k) P(A_j | H_k), \ P(H_k | \overline{A}_j) = P(H_k) P(\overline{A}_j | H_k). \quad (4)$$

При этом соблюдается равенство отношений нормированных вероятностей отношениям соответствующих им нормируемых вероятностей:

$$\frac{P(H_k | A_j)}{P(H_k | \overline{A}_j)} = \frac{P(H_k)\ P(A_j | H_k)}{P(H_k)\ P(\overline{A}_j | H_k)}.$$

На основе субъективного выбора нетрадиционно записываемых полных групп несовместных комбинированных событий можно увеличить количество модификаций формулы Байеса, включающих свидетельства, а также то или иное количество их отрицаний. Например, наиболее полной группе комбинированных событий $\bigcup_{k=1}^{n} \bigcup_{i=1}^{m} H_k E_i \cup \bigcup_{k=1}^{n} \bigcup_{i=1}^{m} H_k \overline{E}_i$ соответствует (с учетом отсутствия нормирующего делителя) модификация формулы Байеса

$$P(H_k | \tilde{E}_i) = P(H_k) P(\tilde{E}_i | H_k),$$

где элементарное событие в виде свидетельства $\tilde{E}_i \in \bigcup_{i=1}^{m} E_i \cup \bigcup_{i=1}^{m} \overline{E}_i$ является одним из элементов указанного множества.

При отсутствии отрицаний свидетельств, то есть при $\tilde{E}_i = E_i \in \bigcup_{i=1}^{m} E_i$,

$$P(H_k | E_i) = \frac{P(H_k)\ P(E_i | H_k)}{\sum_{k=1}^{n} P(H_k)\ P(E_i | H_k)}.$$

Таким образом, модификация формулы Байеса, предназначенная для определения сравниваемых по степени возможности условных вероятностей гипотез при одиночных несовместимых свидетельствах выглядит следующим образом. В числителе содержится нормируемая вероятность одного из комбинированных несовместных событий, образующих полную группу, выраженную в виде произведения априорных вероятностей, а в знаменателе — сумма всех

нормируемых вероятностей. При этом соблюдается принцип сохранения отношений вероятностей — и получаемый результат является правильным.

Вероятности гипотез при одиночных совместимых свидетельствах. Формулы Байеса традиционно применяются для определения сравниваемых по степени возможности апостериорных условных вероятностей гипотез H_k ($k = 1,\ldots,n$) при одном из нескольких рассматриваемых совместимых свидетельств E_i ($i = 1,\ldots,m$). В частности (см., например, [5] и [6]), при определении апостериорных условных вероятностей $P(H_1|E_1)$ и $P(H_1|E_2)$ при каждом из двух совместимых свидетельств E_1 и E_2 употребляются формулы вида:

$$P(H_1|E_1) = \frac{P(H_1)\,P(E_1|H_1)}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k)\,P(E_1|H_k)} \text{ и } P(H_1|E_2) = \frac{P(H_1)\,P(E_2|H_1)}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k)\,P(E_2|H_k)}. \quad (5)$$

Необходимо учесть, что это еще один случай, когда формула Байеса неприменима. Причем в данном случае должны быть устранены два недостатка:

— проиллюстрированное нормирование вероятностей комбинированных событий некорректно, ввиду принадлежности разным полным группам рассматриваемых событий [10];

— в символических записях комбинированных событий H_kE_1 и H_kE_2 не находит отражения тот факт, что учитываемые свидетельства E_1 и E_2 являются совместимыми.

Для устранения последнего недостатка может быть использована более развернутая запись комбинированных событий с учетом того, что совместимые свидетельства E_1 и E_2 в одних случаях могут быть несовместными, а в других совместными:

$$H_kE_1 = H_kE_1E_2 \text{ и } H_kE_2 = H_k\overline{E}_1E_2 + H_kE_1E_2,$$

где $\overline{E}_1$ и $\overline{E}_2$ являются свидетельствами, противоположными E_1 и E_2.

Очевидно, что в таких случаях произведение событий $H_kE_1E_2$ учитывается дважды. Кроме того, оно может быть учтено еще раз отдельно, однако этого не происходит. Дело в том, что в рассматриваемой ситуации на оцениваемую обстановку влияют три вероятных несовместимых комбинированных события: $H_kE_1\overline{E}_2$, $H_k\overline{E}_1E_2$ и $H_kE_1E_2$. При этом для лица, принимающего решение, представляет интерес оценка по степени возможности лишь двух несовместимых комбинированных событий: $H_kE_1\overline{E}_2$ и $H_k\overline{E}_1E_2$, что соответствует рассмотрению только одиночных свидетельств.

Таким образом, при построении модификации формулы Байеса для определения апостериорных условных вероятностей гипотез при одиночных совместимых свидетельствах необходимо исходить из следующего. Лицо, принимающее решение, интересует, какое именно элементарное событие, представленное тем или иным свидетельством из числа рассматриваемых, реально произошло в конкретных условиях. Если происходит другое элементарное событие в виде одиночного свидетельства, требуется пересмотр решения, обусловленного результатами сравнительной оценки апостериорных условных вероятностей гипотез с непременным учетом других условий, влияющих на реальную обстановку.

Введем следующее обозначение: $H_kE_i^-$ для одного (и только одного) несовместимого комбинированного события, состоящего в том, что из $m > 1$ рассматриваемых элементарных событий E_i ($i = 1,\ldots,m$) совместно с гипотезой H_k произошло одно элементарное событие E_1 и не произошли другие элементарные события.

В наиболее простом случае рассматриваются два одиночных несовместимых свидетельства. Если подтверждается одно из них, условная вероятность свидетельства в общем виде выражается формулой

$$P(H_k\,E_i^-) = P(E_i|H_k) - P(E_1E_2|H_k) = P(E_i|H_k) - P(E_1|H_k)P(E_2|H_k),\ i = 1,\ldots,2. \quad (6)$$

В справедливости формулы можно наглядно убедиться (рис. 1).

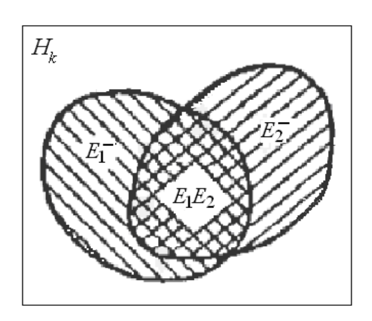


Рис. 1. Геометрическая интерпретация вычисления $P(H_k\,E_i^-)$ при i = 1,…,2

При условно независимых свидетельствах

$$P(E_1E_2|H_k) = P(E_1|H_k)P(E_2|H_k),$$

поэтому с учетом (6)

$$P(H_k\,E_i^-) = P(E_i|H_k) - P(E_1|H_k)\,P(E_2|H_k),\ i = 1,\dots,2. \quad (7)$$

Аналогично вероятность $P(H_kE_i^-)$ одного из трех (i = 1,…,3) несовместимых событий $H_kE_i^-$ выражается формулой

$$P(H_k\,E_i^-) = P(E_i|H_k) - [\sum_{j=1(j\neq i)}^{3} P(E_i|H_k)\,P(E_j|H_k)] + P(E_1E_2E_3|H_k).$$

Например, при i = 1:

$$P(H_k\,E_1^-) = P(E_1|H_k) - P(E_1E_2|H_k) - P(E_1E_3|H_k) + P(E_1E_2E_3|H_k).$$

Справедливость данной формулы наглядно подтверждает геометрическая интерпретация, представленная на рис. 2.

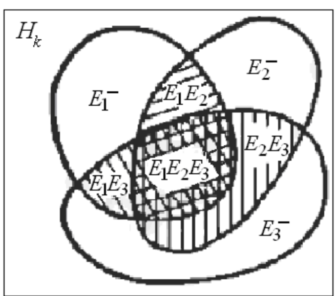


Рис. 2. Геометрическая интерпретация вычисления $P(H_k\,E_i^-)$ при i = 1,…,3

Методом математической индукции можно доказать общую формулу для вероятности $P(H_k\,E_i^-)$ при любом количестве свидетельств E_i (i=1,…,m):

$$P(H_kE_i^-) = P(E_i|H_k) - \sum_{j=1(j\neq i)}^{m} P(E_i|H_k)\,P(E_j|H_k) + \sum_{j,l\neq i}^{m} P(E_i|H_k)\,P(E_j|H_k)\,P(E_j|H_k) + \dots + (-1)^{m-1}. \quad (8)$$

Используя теорему умножения вероятностей, запишем условную вероятность $P(H_kE_i^-)$ в двух формах:

$$P(H_k\,E_i^-) = P(H_k)\,P(E_i^-|H_k) = P(E_i^-)\,P(H_k|E_i^-),$$

из которых следует, что

$$P(H_k|E_i^-) = \frac{P(H_kE_i^-)}{P(E_i^-)}.$$

С использованием формулы полной вероятности $P(E_i^-) = \sum_{k=1}^{n} P(H_k)\ P(E_i^-|H_k)$ получается, что

$$P(H_k \mid E_i^-) = \frac{P(H_k E_i^-)}{\sum_{k=1}^{n} P(H_k E_i^-)}.$$

Подставив в полученную формулу выражения для $P(H_k E_i^-)$ в виде правой части (8), получим окончательный вид формулы для определения апостериорных условных вероятностей гипотез H_k $(k = 1,\dots,n)$ при одном из нескольких рассматриваемых несовместимых одиночных свидетельств: $(E_j \mid H_k)$

$$P(H_k \mid E_i^-) = \frac{P(H_k)[P(E_i \mid H_k) - \sum_{j=1(j \neq i)}^{m} P(E_i \mid H_k)\, P(E_j \mid H_k) + \ldots + (-1)^{m-1} P(\prod_{j=1}^{m} P(E_j \mid H_k)]}{\sum_{k=1}^{n} P(H_k) \sum_{i=1}^{m} [P(E_i \mid H_k) - \sum_{j=1(j \neq i)}^{m} P(E_i \mid H_k)\, P(E_j \mid H_k) + \ldots + (-1)^{m-1} P(\prod_{j=1}^{m} P(E_j \mid H_k)]} \quad (9)$$

Сравнительные оценки. Рассматриваются довольно простые, но наглядные примеры, ограничивающиеся анализом вычисляемых апостериорных условных вероятностей одной из двух гипотез при двух одиночных свидетельствах.

1. Вероятности гипотез при несовместимых одиночных свидетельствах. Сравним результаты, получаемые с применением формул Байеса (2) и (3), на примере двух свидетельств $A_j = A$ и $A_j = A$ при исходных данных:

$$P(H_1) = 0{,}7;\ P(H_2) = 0{,}3;\ \ P(A \mid H_1) = 0{,}1;$$

$$P(\overline{A} \mid H_1) = 0{,}9;\ P(A \mid H_2) = 0{,}6;\ P(\overline{A} \mid H_2) = 0{,}4.$$

В рассматриваемых примерах с гипотезой H_1 традиционные формулы (2) и (3) приводят к следующим результатам:

$$P(H_1 \mid A) = \frac{P(H_1)\ P(\mathrm{A} \mid H_1)}{\sum_{k=1}^{2} P(H_k)\ P(\mathrm{A} \mid H_k)} = \frac{0.07}{0{,}25} = 0{,}28,$$

$$P(H_1 \mid \overline{A}) = \frac{P(H_1)\ P(\overline{\mathrm{A}} \mid H_1)}{\sum_{k=1}^{2} P(H_k)\ P(\overline{\mathrm{A}} \mid H_k)} = \frac{0.63}{0{,}75} = 0{,}84,$$

а при предлагаемых формулах (4), не имеющих нормирующих делителей:

$$P(H_1 \mid A) = P(H_1)\ P(A \mid H_1) = 0{,}07;\ \ P(H_1 \mid \overline{\mathrm{A}}) = P(H_1)\ P(\overline{\mathrm{A}} \mid H_1) = 0{,}63.$$

Таким образом, в случае применения предлагаемых формул отношение нормируемых вероятностей равно отношению нормированных вероятностей:

$$\frac{P(H_1)\ P(\mathrm{A} \mid H_1)}{P(H_1)\ P(\overline{\mathrm{A}} \mid H_1)} = \frac{P(\mathrm{A} \mid H_1)}{P(\overline{\mathrm{A}} \mid H_1)} = \frac{0{,}07}{0{,}63} = 0{,}11. \quad (10)$$

При использовании известных формул при таком же отношении $\frac{P(H_1)\ P(\mathrm{A} \mid H_1)}{P(H_1)\ P(\overline{\mathrm{A}} \mid H_1)} = 0{,}11$ нормируемых вероятностей, указанных в числителях, отношение получаемых нормированных вероятностей:

$$\frac{P(H_1 \mid A)}{P(H_1 \mid \overline{A})} = \frac{0{,}28}{0{,}84} = 0{,}33. \quad (11)$$

То есть принцип сохранения отношений вероятностей не соблюдается, и получаются неверные результаты. При этом в случае применения известных формул значение относительного отклонения отношения (11) апостериорных условных вероятностей гипотез от корректных результатов (10) оказывается весьма существенным, так как составляет $\frac{0{,}33 - 0{,}11}{0{,}11} \times 100 = 242\%.$.

2. Вероятности гипотез при совместимых одиночных свидетельствах. Сравним результаты, получаемые с применением формул Байеса (5) и построенной корректной модификации (9), используя следующие исходные данные:

$$P(H_1) = 0{,}7;\ \ P(H_2) = 0{,}3;\ \ P(E_1 \mid H_1) = 0{,}4;$$

$$P(E_2 \mid H_1) = 0{,}8;\ \ P(E_1 \mid H_2) = 0{,}7;\ \ P(E_2 \mid H_2) = 0{,}2.$$

В рассматриваемых примерах с гипотезой H_2 в случае использования традиционных формул (5):

$$P(H_2 | E_1) = \frac{P(H_2)\, P(E_1 | H_2)}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k)\, P(E_1 | H_k)} = \frac{0{,}21}{0{,}49} = 0{,}429\ ,$$

$$P(H_2 | E_2) = \frac{P(H_2)\, P(E_2 | H_2)}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k)\, P(E_2 | H_k)} = \frac{0{,}06}{0{,}62} = 0{,}097.$$

В случае же применения предлагаемой формулы (9) с учетом (7)

$$P(H_2 | E_i^{-}) = \frac{P(H_2)[P(E_1|H_2) - P(E_1|H_2)\, P(E_2|H_2)]}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k) \sum\limits_{i=1}^{2} [P(E_i|H_k) - P(E_1|H_k)\, P(E_2|H_k)]} = \frac{0{,}168}{0{,}578} = 0{,}291,$$

$$P(H_2 | E_2^{-}) = \frac{P(H_2)[P(E_2|H_2) - P(E_1|H_2)\, P(E_2|H_2)]}{\sum\limits_{k=1}^{2} P(H_k) \sum\limits_{i=1}^{2} [P(E_i|H_k) - P(E_1|H_k)\, P(E_2|H_k)]} = \frac{0{,}018}{0{,}578} = 0{,}031.$$

При использовании предлагаемых корректных формул, ввиду одинаковых знаменателей, отношение $\frac{P(H_2)[P(E_1|H_2) - P(E_1|H_2)\, P(E_2|H_2)]}{P(H_2)[P(E_2|H_2) - P(E_1|H_2)\, P(E_2|H_2)]}$ нормируемых вероятностей, указываемых в числителях, равно отношению нормированных вероятностей:

$$\frac{P(\mathrm{H}_2 | E_1^{-})}{P(\mathrm{H}_2 | E_2^{-})} = \frac{0{,}291}{0{,}031} = 9{,}387. \qquad (12)$$

То есть принцип сохранения отношений вероятностей соблюдается.

Однако в случае применения известных формул при отношении указанных в числителях нормируемых вероятностей

$$\frac{P(H_2)\, P(E_1|H_2)}{P(H_2) P(E_2|H_2)} = \frac{0{,}21}{0{,}06} = 3{,}5$$

отношение нормированных вероятностей:

$$\frac{P(H_2|E_1)}{P(H_2|E_2)} = \frac{0{,}429}{0{,}097} = 4{,}423. \qquad (13)$$

То есть принцип сохранения отношений вероятностей, как и прежде, не соблюдается. При этом в случае применения известных формул значение относительного отклонения отношения (13) апостериорных условных вероятностей гипотез от корректных результатов (12) также оказывается весьма существенным:

$$\frac{9{,}387 - 4{,}423}{9{,}387} \times 100 = 52{,}9\%.$$

Заключение. Анализ построения конкретных формульных соотношений, реализующих формулу Байеса и ее модификации, предлагаемые для решения практических задач, позволяют утверждать следующее. Полная группа сравниваемых по степени возможности комбинированных событий может выбираться субъективно лицом, принимающим решение. Данный выбор основывается на учитываемых объективных исходных данных, характерных для типовой обстановки (конкретные виды и количество элементарных событий — оцениваемых гипотез и свидетельств). Представляет практический интерес субъективный выбор других вариантов полной группы сравниваемых по степени возможности комбинированных событий — таким образом обеспечивается существенное разнообразие формульных соотношений при построении нетрадиционных вариантов модификаций формулы Байеса. На этом, в свою очередь, может основываться совершенствование математического обеспечения программной реализации, а также расширение области применения новых формульных соотношений для решения прикладных задач.

Библиографический список

1. Gnedenko, B. V. An elementary introduction to the theory of probability / B. V. Gnedenko, A. Ya. Khinchin. — New York : Dover Publications, 1962. — 144 p.

2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — 10-е изд., стер. — Москва : Высшая школа, 2006. — 575 с.

3. Андронов. А. М., Теория вероятностей и математическая статистика / А. М. Андронов, Е. А. Копытов, Л. Я. Гринглаз. — Санкт-Петербург : Питер, 2004. — 481 с.

4. Змитрович, А. И. Интеллектуальные информационные системы / А. И. Змитрович. — Минск : ТетраСистемс, 1997. — 496 с.

5. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. — 416 с.

6. Naylor, C.-M. Build Your Own Expert System / C.-M. Naylor. — Chichester : John Wiley & Sons, 1987. — 289 p.

7. Романов, В. П. Интеллектуальные информационные системы в экономике / В. П. Романов. — 2-е изд., стер. — Москва : Экзамен, 2007. — 496 с.

8. Экономическая эффективность и конкурентоспособность / Д. Ю. Муромцев [и др.]. — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007.— 96 с.

9. Долгов, А. И. Корректные модификации формулы Байеса для параллельного программирования / А. И. Долгов // Суперкомпьютерные технологии : мат-лы 3-й всерос. науч-техн. конф. — Ростов-на-Дону. — 2014.— Т. 1 — С. 122–126.

10.Долгов, А. И. О корректности модификаций формулы Байеса / А. И. Долгов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 3 (78). — С. 13–20.

References

1. Gnedenko, B.V., Khinchin, A.Ya. An elementary introduction to the theory of probability. New York: Dover Publications, 1962, 144 p.

2. Ventsel, E.S. Teoriya veroyatnostey. [Theory of probabilities.] 10th ed., reimpr. Moscow: Vysshaya shkola, 2006, 575 p. (in Russian).

3. Andronov, A.M., Kopytov, E.A., Gringlaz, L.Y. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. [Theory of probabilities and mathematical statistics.] St.Petersburg: Piter, 2004, 481 p. (in Russian).

4. Zmitrovich, A.I. Intellektual'nye informatsionnye sistemy. [Intelligent information systems.] Minsk: TetraSistems, 1997, 496 p. (in Russian).

5. Chernorutskiy, I.G. Metody prinyatiya resheniy. [Decision-making techniques.] St.Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005, 416 p. (in Russian).

6. Naylor, C.-M. Build Your Own Expert System. Chichester: John Wiley & Sons, 1987, 289 p.

7. Romanov, V.P. Intellektual'nye informatsionnye sistemy v ekonomike. [Intelligent information systems in economy.] 2nd ed., reimpr. Moscow: Ekzamen, 2007, 496 p. (in Russian).

8. Muromtsev, D.Y., et al. Ekonomicheskaya effektivnost' i konkurentosposobnost'. [Economic efficiency and competitiveness.] Tambov: Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2007, 96 p. (in Russian).

9. Dolgov, A.I. Korrektnye modifikatsii formuly Bayesa dlya parallel'nogo programmirovaniya. [Correct modifications of the Bayesian formula for parallel programming.] Superkomp'yuternye tekhnologii: mat-ly 3-y vseros. nauch-tekhn. konf. [Supercomputer technologies: Proc. III All-Russian Sci.-Tech. Conf.] Rostov-on-Don, 2014, vol. 1, pp. 122–126 (in Russian).

10. Dolgov, A.I. O korrektnosti modifikatsiy formuly Bayesa. [About correctness of Bayes formula modifications.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 3 (78), pp. 13–20 (in Russian).

Поступила в редакцию 21.09.2015
Сдана в редакцию 21.09.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 512.64+517.5 DOI 10.12737/16052

Об алгоритме построения тёплицевых матриц с заданным числом компонент связности дополнения предельного спектра*

С. А. Золотых**

[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

On Toeplitz matrices construction algorithm with a given number of connected components of the limitary spectrum complement***

S. A. Zolotykh**

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Исследуются простейшие топологические свойства предельного спектра, а именно связность его дополнения в комплексной плоскости. В работе проведена численная проверка оценок снизу для максимального числа компонент связности дополнения предельного спектра ленточных тёплицевых матриц, символ которых — полином Лорана заданной степени. Приведён алгоритм вычисления параметров символа тёплицевой матрицы, предельный спектр которой разбивает комплексную плоскость на заданное число компонент связности. Численно исследованы примеры полиномов, являющихся символами тёплицевых матриц, предельный спектр которых делит комплексную плоскость на заданное множество компонент связности. Приведены графики предельных спектров тёплицевых матриц, иллюстрирующие полученные в работе результаты. Проведено сравнение полученных методами работы предельных спектров и спектров тёплицевых матриц больших размеров с заданным символом.

Ключевые слова: ленточная тёплицева матрица, символ тёплицевой матрицы, предельный спектр, число компонент связности.

The simplest topological properties of the approximate spectrum, namely the connectivity of its complement in the complex plane, are studied. A numerical verification of the lower bounds for the maximum number of the connected components of the limitary spectrum complement of the band Toeplitz matrices whose symbol is Laurent polynomial of the specified degree, is carried out. The algorithm for computation of the Toeplitz matrix symbol parameters with its approximate spectrum dividing the complex plane into a given number of connected components is adduced. The examples of polynomials which are Toeplitz matrices symbols with the limitary spectrum dividing the complex plane into a given set of connected components are numerically investigated. Graphs of the limitary spectra of Toeplitz matrices illustrating the results obtained are given. The obtained limitary spectra are compared to the Toeplitz matrices spectra of large size with a given symbol.

Keywords: banded Toeplitz matrix, Toeplitz matrix symbol, limitary spectrum, number of connected components.

Введение. В данной работе решается задача экспериментальной проверки оценок снизу максимального числа компонент связности дополнения предельного спектра ленточных тёплицевых матриц, символы которых — лорановские полиномы заданной степени. Вычисляются значения параметров символа последовательности ленточных тёплицевых матриц, дополнение предельного спектра которых имеет заданное число компонент связности из промежутка значений, границы которого найдены в работе [1]. Заметим, что это — часть общей задачи исследования геометрии предельного спектра ленточных тёплицевых матриц [2–6]. Отметим, что в случае тёплицевых матриц с более сложным символом предельный спектр часто допускает явное и относительно простое описание по сравнению с предельным спектром ленточных тёплицевых матриц [7–8]. Уточним постановку задачи и напомним необходимые для понимания

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: Svetlana.zolotyx@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

работы понятия [5, 9]. Пусть f — комплекснозначная функция, аналитическая в окрестности окружности единичного радиуса $S^1 = \{z \in C : |z| = 1\}$:

$$f(z) = \sum_{k \in Z} a_k z^k . \quad (1)$$

Будем обозначать через $T_n(f)$ тёплицеву матрицу размера $n \times n$, то есть матрицу $T_n(f) = (a_{i,j})_{i,j=1}^{n}$, матричные элементы которой задаются формулой $a_{i,j} = a_{i-j}$, где a_k находятся из (1). Отметим, что у тёплицевой матрицы на каждой из диагоналей, параллельных главной, стоят одинаковые элементы. Заметим, что если для $k < -r$ и для $k > h$, $a_k = 0$, то есть аналитическая функция $f(z)$ превращается в лорановский полином $f(z) = \sum_{k=-r}^{h} a_k z^k$, то соответствующая такой функции тёплицева матрица называется ленточной.

Упорядочим каким-нибудь образом собственные значения $\{\lambda_{n,i}\}_{i=-n+1}^{n-1}$ матрицы $T_n(f)$ так, что $|\lambda_{n,i}| \le |\lambda_{n,j}|$ при $i < j$. Множество предельных точек последовательностей $\{\lambda_{n,i}\}_{n=1}^{\infty}$ будем называть предельным спектром последовательности тёплицевых матриц $\{T_n(f)\}_{n=1}^{\infty}$ и обозначать через $\sigma_l(f)$.

Далее выясним, как связан предельный спектр с функцией $f(z)$ (которую также называют символом каждой из матриц последовательности $\{T_n(f)\}_{n=1}^{\infty}$) и какова геометрическая структура предельного спектра. Для самосопряжённых матриц ответ известен давно. Предельный спектр — это отрезок вещественной прямой. Несамосопряжённый случай намного сложнее. В работе Ф. Спитцера и П. Шмидта [2] было получено описание предельного спектра несамосопряжённых тёплицевых матриц в терминах совпадения модулей корней многочлена строящегося по символу последовательности ленточных теплицевых матриц. Используя такое описание, Ф. Спитцер и П. Шмидт доказали, что предельный спектр является либо одномерным множеством, являющимся объединением аналитических дуг, либо нуль-мерным множеством, состоящим из точки. Позднее Ульман доказал связность предельного спектра [3]. Более тонкие геометрические вопросы о строении предельного спектра ленточных несамосопряжённых матриц являются открытыми вопросами до настоящего времени. В данной работе исследуется вопрос о числе компонент дополнения предельного спектра ленточных тёплицевых матриц. Экспериментально доказывается, что число этих компонент может быть сколь угодно большим. Построены конкретные примеры символов — полиномов Лорана, таких, что предельный спектр соответствующих им тёплицевых матриц разбивает комплексную плоскость на максимальное число компонент связности, равное $\left[\frac{k+1}{2}\right]$, где $2k$ — степень полинома Лорана, являющегося символом данной последовательности тёплицевых матриц. В основе работы лежит способ специального выбора параметров полиномов Лорана, являющихся символами тёплицевых матриц, предельный спектр которых разбивает комплексную плоскость на заданное число компонент связности r, где $1 \le r \le \left[\frac{k+1}{2}\right]$. Таким образом, на основе численного эксперимента получаем некоторые оценки снизу для максимального числа компонент, на которые может разбивать комплексную плоскость предельный спектр последовательности тёплицевых матриц с символом заданной степени k. Заметим, что в данной работе уточняется часть результатов, анонсированных в работе [10]. Следует также отметить, что вопросы геометрии предельного спектра играют большую роль при изучении асимптотики собственных чисел тёплицевых матриц больших размеров [4]. В работе использованы следующие стандартные обозначения: $\sigma(A)$ — спектр оператора A: $\sigma(A) = \{\lambda \in C : A - \lambda I - \textit{необратим}\}$.

Основной результат работы. Рассмотрим многочлен

$$b(t) = \mu + t^{-k}(t-\alpha)^k (t-\beta)^k , \quad (2)$$

где μ, α, β являются комплексными числами, и $\alpha \cdot \beta \ne 0$. Пусть $a(t) = t^{-1}(t-\alpha)(t-\beta)$. Легко видеть, что $b(t) = \mu + (a(t))^k$.

Далее численно проверим следующий результат, анонсированный в [4].

Теорема 1. Если $k = 1$ или $k = 2$, тогда $C \setminus \sigma_l(b)$ связен.

2. Если $k \ge 3$ тогда $C \setminus \sigma_l(b)$ имеет по меньшей мере $\left[\frac{k+1}{2}\right]$ компонент (включая неограниченную компоненту).

3. Для каждого натурального числа j между 1 и $\left[\frac{k+1}{2}\right]$ существуют такие α, β, что $C\setminus\sigma_l(b)$ имеет ровно j компонент. Именно α, β находятся из уравнений

$$\begin{cases} -(\alpha+\beta)+2\sqrt{\alpha\cdot\beta}=f_1, \\ -(\alpha+\beta)-2\sqrt{\alpha\cdot\beta}=f_2. \end{cases} \quad (3)$$

При этом f_1, f_2 следует выбирать так, чтобы разность значений их аргументов удовлетворяла следующему условию:

$$\frac{\pi(r-1)}{k} < |arg(f_1)-arg(f_2)| < \frac{\pi r}{k}, \; r=1,\ldots.k \,. \quad (4)$$

В этом случае число компонент связности дополнения предельного спектра будет равно $\left[\frac{r+1}{2}\right]$.

Замечание. Приведём явный способ построения символа тёплицевых матриц, предельный спектр которых делит комплексную плоскость на число $s=1,\ldots k$ компонент связности, уточняющий приведённую выше теорему. Зафиксируем произвольное комплексное число z_0, отличное от 0. Выберем угол φ, удовлетворяющий следующему условию:

$$\frac{\pi(s-1)}{k} < \varphi < \frac{\pi s}{k}. \quad (5)$$

Положим $f_1 = z_0$, $f_2 = e^{i\varphi}z_0$. Мы можем, используя формулы (3) явно найти значения параметров α, β, чтобы выполнялось условие (4):

$$\begin{cases} \alpha = -\dfrac{z_0+e^{i\varphi}z_0}{4}+\dfrac{1}{2}z_0e^{i\varphi/2}, \\ \beta = -\dfrac{z_0+e^{i\varphi}z_0}{4}-\dfrac{1}{2}z_0e^{i\varphi/2}. \end{cases}$$

Примеры вычисления предельных спектров. Ниже, используя описанную выше схему вычисления параметров символа тёплицевой матрицы, предельный спектр которой разбивает комплексную плоскость на заданное число r компонент связности, находим значения параметров символа. Результаты вычислений сведены в таблицу.

Отметим, что значение μ выбирается так, чтобы $|\mu-(\alpha+\beta)|>0$ и было достаточно мало, а $|\alpha\cdot\beta|>0$ достаточно велико. Будем рассматривать символ $b(t)=\mu+t^{-k}(t-\alpha)^k(t-\beta)^k$ с параметрами из следующей таблицы:

Таблица 1

Связь числа компонент связности и параметров символа

Число компонент r	Угол φ $\frac{\pi(s-1)}{k}<\varphi<\frac{\pi s}{k}$	f_1	f_2	α	β	μ	k
1	$0<\varphi<\pi$, пусть $\varphi=1{,}11$	8–7i	9,8272+ 4,0529i	0,7871– 0,1301i	–9,7007+ 1,6036i	–8,9+1,5i	1
2	$\frac{2\pi}{3}<\varphi<\pi$, пусть $\varphi=2{,}48$	8–7i	–2,0115+ 10,4381i	3,1123+ 1,7868i	–6,1065– 3,5058i	2,7+1,7i	3
3	$\frac{4\pi}{5}<\varphi<\pi$, пусть $\varphi=2{,}52$	8–7i	–2,4273+ 10,3493i	3,1624+ 1,9007i	–5,9487– 3,5753i	–2,5–1,5i	5
4	$\frac{6\pi}{7}<\varphi<\pi$, пусть $\varphi=2{,}71$	8–7i	–4,3382+ 9,7046i	3,3599+ 2,4816i	–5,1908– 3,8340i	–1,8–1,3i	7

Приведём примеры предельных спектров последовательностей тёплицевых матриц с символами вида (2), параметры которого заданы в таблице 1. Номера рисунков соответствуют номерам параметров символа из таблицы.

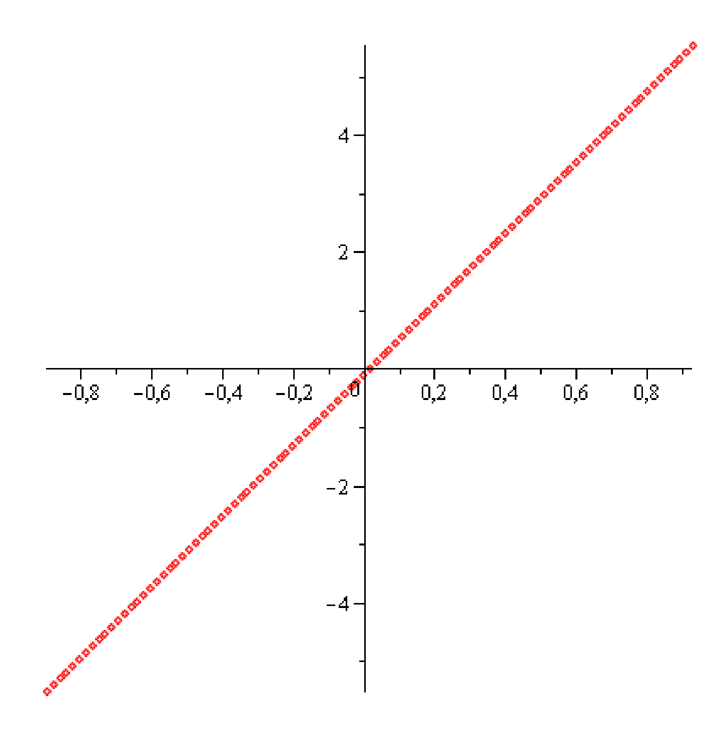


Рис. 1. Одна компонента связности дополнения предельного спектра

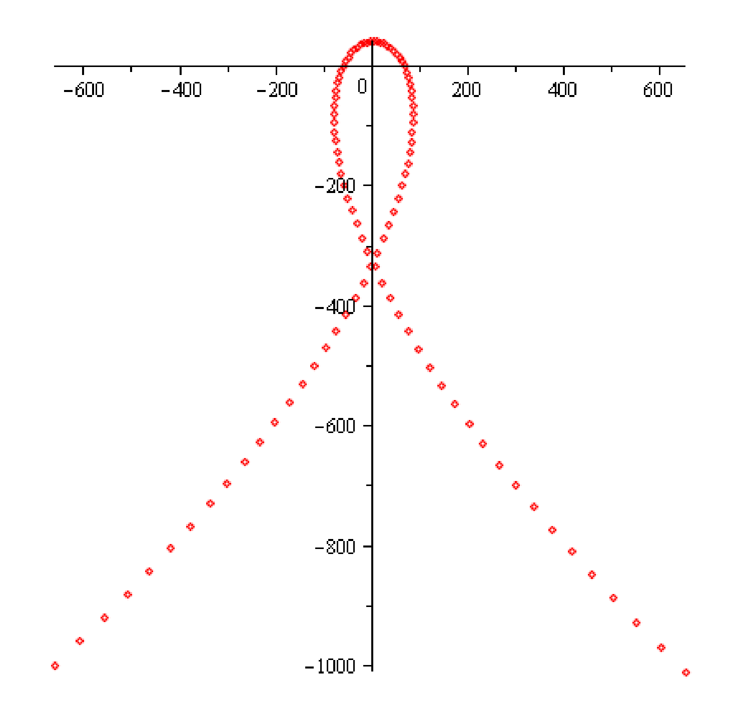


Рис. 2. Две компоненты связности дополнения предельного спектра

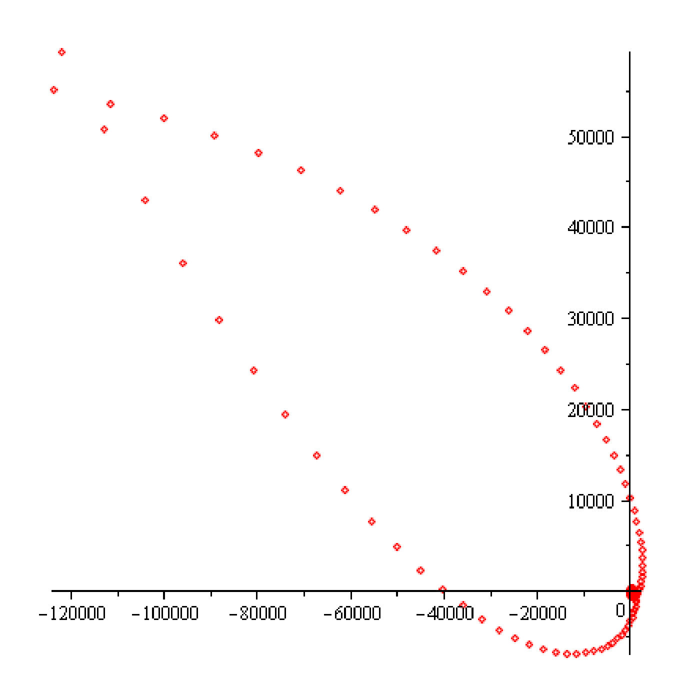


Рис. 3. Три компоненты связности дополнения предельного спектра

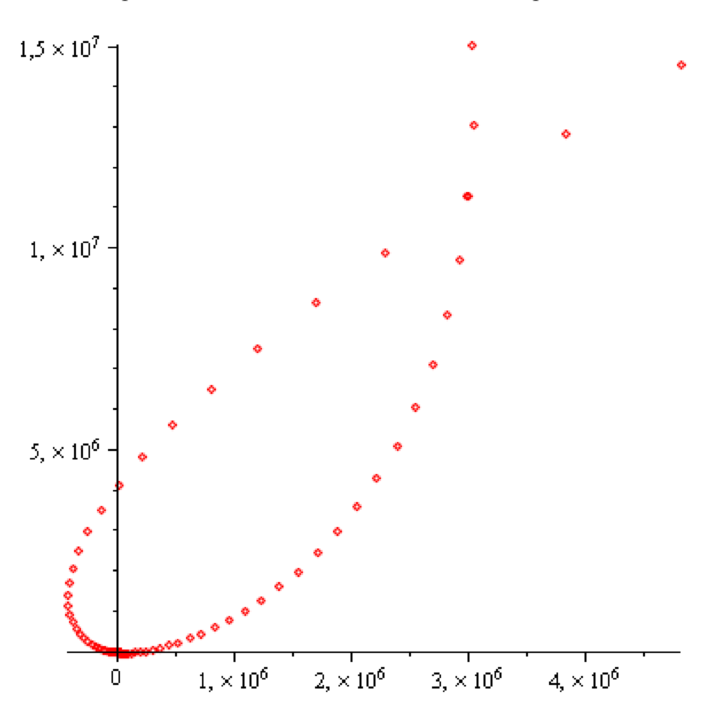


Рис. 4. Четыре компоненты связности дополнения предельного спектра

Замечание. К сожалению, возможности программы Maple аналитических вычислений не позволяют хорошо рассмотреть на рис. 4 число компонент связности дополнения предельного спектра из-за большой разницы масштабов различных компонент связности дополнения предельного спектра.

Сравнение предельного спектра и спектра ленточных тёплицевых матриц. Рассмотрим примеры вычисления спектра ленточных тёплицевых матриц достаточно больших размеров с рассмотренными выше символами. Такие спектры должны быть хорошими приближениями предельных спектров, построенных в предыдущем пункте. В настоящей работе важно показать, что в пределе по размеру матрицы спектры рассмотренных матриц стремятся к кривой, дополнение которой содержит нужное число компонент связности, такое же как и на соответствующих графиках из предыдущего пункта.

Рассмотрим тёплицевы матрицы с символом $b(t) = \mu + t^{-k}(t-\alpha)^k(t-\beta)^k$ при

$$k = 3,\ \alpha = 3{,}1123 + 1{,}7868i,\ \beta = -6{,}1065 - 3{,}5058i,\ \mu = 2{,}7 + 1{,}7i\ . \quad (6)$$

В этом случае символ имеет следующий вид:

$$b(t)=t^3+(8{,}9820+5{,}1570i)t^2+(-20{,}1961-34{,}5865i)t-0{,}8233-480{,}6002i+$$
$$+\frac{-497{,}4325+881{,}4213i}{t}+\frac{-5687{,}1709+3376{,}5336i}{t^2}+\frac{16135{,}0717-236{,}3335i}{t^3}. \qquad (7)$$

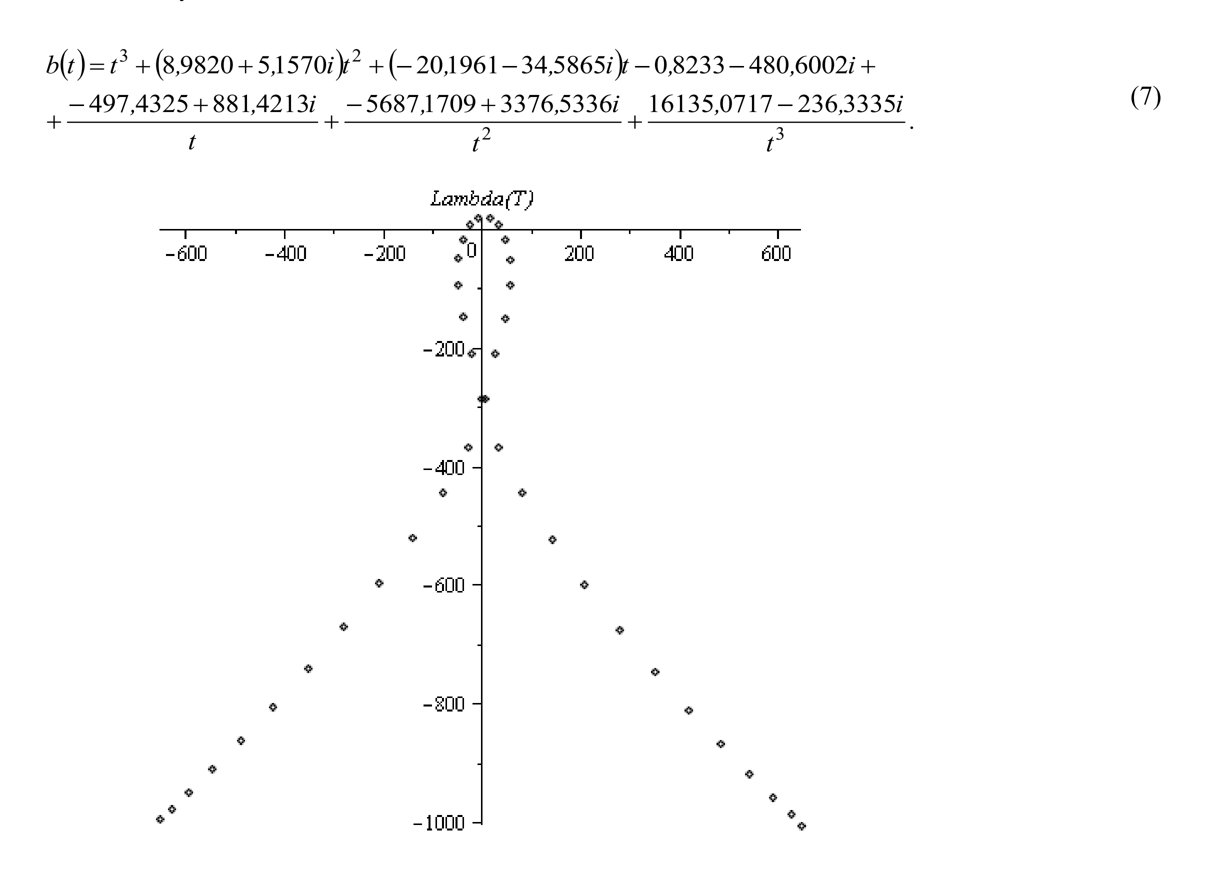


Рис. 5. График собственных значений тёплицевой матрицы с символом (7) размера $n=40$

Заключение. Экспериментально исследован вопрос о числе компонент связности дополнения предельного спектра ленточных тёплицевых матриц, лорановский полином которых — многочлен вида $b(t)=\mu+t^{-k}(t-\alpha)^k(t-\beta)^k$. Рассмотрен алгоритм построения тёплицевых матриц с данным символом и заранее заданным числом компонент связности дополнения предельного спектра. Экспериментально проверено, что для каждого натурального числа j между 1 и $\left[\frac{k+1}{2}\right]$ можно подобрать такой символ $b(t)=\mu+t^{-k}(t-\alpha)^k(t-\beta)^k$, что предельный спектр тёплицевых матриц с этим символом делит комплексную плоскость ровно на j компонент связности. Этот результат даёт, в частности, оценку снизу для максимального числа компонент дополнения предельного спектра для ленточных тёплицевых матриц с символом — многочленом Лорана заданной степени.

Библиографический список

1. Boettcher, A. Spectral properties of banded Toeplitz matrices / A. Boettcher, S. Grudsky. — Philadelphia : SIAM, 2005. — 422 p.

2. Schmidt, P. The Toeplitz matrices of an arbitrary Laurent polynomial / P. Schmidt, F. Spitzer // Math. Scand. — 1960. — V. 8. — P. 15–38.

3. Ullman, J. L. A problem of Schmidt and Spitzer / J. L. Ullman // Bull. Amer. Math. Soc. — 1967. — V. 73. — P. 883–885.

4. Batalshikov, A. Asymptotics of eigenvalues of large symmetric banded Toeplitz matrices / A. Batalshikov, S. Grudsky, V. Stukopin // Linear Algebra and its Applications. — 2015. — V. 469. — P. 464–486.

5. Золотых, С. А. О вычислении предельного спектра ленточных тёплицевых матриц / С. А. Золотых, В. А. Стукопин // Математический форум. (Итоги науки. Юг России.) —2013. — Т. 7. — С. 80–87. Золотых, С. А. Об описании предельного спектра ленточных тёплицевых матриц / С. А. Золотых, В. А. Стукопин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — №8(69). — С. 5–11.

6. Батальщиков, А. А. О распределении собственных чисел тёплицевых матриц с символом Хартвига-Фишера / А. А. Батальщиков, В. А. Стукопин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — № 3. — С. 812–819.

7. Widom, H. Eigenvalue distribution of nonselfadjoint Toeplitz matrices and the asymptotics of Toeplitz

determinants in the case of nonvanishing index / H. Widom // Oper. Theory: Adv. Appl. — 1990. — V. 48. — P. 387–421.

8. Золотых, С. А. Об оценках снизу для максимального числа компонент дополнения предельного спектрпоследовательности тёплицевых матриц с символом заданной степени / С. А. Золотых // Порядковый анализ и смежные вопросы математического моделирования : сб. трудов междунар. науч. конф. — Владикавказ, 2015. — С. 72 — 73.

9. Золотых, С. А. Об оценке числа компонент связности предельного спектра ленточных тёплицевых матриц / С.А. Золотых, В. А. Стукопин // Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения–III : сб. трудов междунар. науч. конф. — Ростов-на-Дону, 2013. — С. 20.

10. Золотых, С. А. Об оценке числа компонент связности предельного спектра ленточных тёплицевых матриц / С. А. Золотых, В. А. Стукопин //Международная конференция "Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения – III". — 2013. — С. 20.

References

1. Boettcher, A., Grudsky, S. Spectral properties of banded Toeplitz matrices. Philadelphia: SIAM, 2005, 422 p.

2. Schmidt, P., Spitzer, F. The Toeplitz matrices of an arbitrary Laurent polynomial. Mathematica Scandinavica, 1960, vol. 8, pp. 15–38.

3. Ullman, J.L. A problem of Schmidt and Spitzer. Bull. Amer. Math. Soc., 1967, vol. 73, no. 6, pp. 883–885.

4. Batalshikov, A., Grudsky, S., Stukopin, V. Asymptotics of eigenvalues of large symmetric banded Toeplitz matrices. Linear Algebra and its Applications, 2015, vol. 469, pp. 464–486.

5. Zolotykh, S.A., Stukopin, V.A. O vychislenii predel'nogo spektra lentochnykh teplitsevykh matrits. [On calculation of the limitary spectrum of band Toeplitz matrices.] Matematicheskiy forum (Itogi nauki. Yug Rossii).2013, vol. 7, pp. 80–87 (in Russian).

6. Zolotykh, S.A., Stukopin, V.A. Ob opisanii predel'nogo spektra lentochnykh teplitsevykh matrits. [On formulation of limitary spectrum of banded Toeplitz matrices.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 8(69), pp. 5–11 (in Russian).

7. Batalshchikov, A.A., Stukopin, V.A. O raspredelenii sobstvennykh chisel teplitsevykh matrits s simvolom Khartviga Fishera. [On distribution of eigen values of Toeplitz matrices with Hartwig-Fisher symbol.] Vestnik of DSTU, 2011, no. 3, pp. 812–819 (in Russian).

8. Widom, H. Eigenvalue distribution of nonselfadjoint Toeplitz matrices and the asymptotics of Toeplitz determinants in the case of nonvanishing index. Oper. Theory: Adv. Appl., 1990, vol. 48, pp. 387–421.

9. Zolotykh, S.A. Ob otsenkakh snizu dlya maksimal'nogo chisla komponent dopolneniya predel'nogo spectra posledovatel'nosti teplitsevykh matrits s simvolom zadannoy stepeni. [On lower bounds for the maximum number of complement components of the limit spectrum of a sequence of Toeplitz matrices with symbol of given degree.] Poryadkovyy analiz i smezhnye voprosy matematicheskogo modelirovaniya: sb. trudov mezhdunar. nauch. konf. [Ordinal analysis and related issues of mathematic simulation: Proc. Int. Sci. Conf.] Vladikavkaz, 2015, pp. 72–73 (in Russian).

10. Zolotykh, S.A., Stukopin, V.A. Ob otsenke chisla komponent svyaznosti predel'nogo spektra lentochnykh teplitsevykh matrits. [On estimation of number of connected components of the limitary spectrum of the band Toeplitz matrices.] Sovremennye metody i problemy teorii operatorov i garmonicheskogo analiza i ikh prilozheniya–III: sb. trudov mezhdunar. nauch. konf. [Modern methods and problems of the theory of operators and harmonic analysis and their applications-III: Proc. Int. Sci. Conf.] Rostov-on-Don, 2013, p. 20 (in Russian).

Поступила в редакцию 21.07.2015
Сдана в редакцию 21.07.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 339.543.5 DOI 10.12737/16110

Использование принципов работы систем для неконтактной идентификации багажа физических лиц при проведении таможенного контроля*

Н. А. Целигоров[1], М. Ю. Щерба[2]**
[1,2] Ростовский филиал Российской таможенной академии, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Using operating principles of systems for nonintrusive identification of individuals' baggage during the customs control***

N. A. Tseligorov[1], M. Y. Shcherba[2]**
[1,2] Russian Customs Academy, Rostov Branch, Rostov-on-Don, Russian Federation

Совершенствование механизма таможенного контроля является приоритетной задачей Федеральной таможенной службы, поскольку таможенный контроль должен быть направлен, с одной стороны, на упрощение и ускорение таможенных операций, а с другой — на защиту интересов государства. Выбор форм таможенного контроля, как известно, базируется на принципах выборочности и достаточности. В связи с этим часто возникает необходимость идентификации багажных мест, в которых могут быть выявлены запрещенные товары, с целью установления личности лиц, перемещающих эти товары. Целью настоящей работы является рассмотрение вопросов применения различных систем неконтактной идентификации объектов, которые обычно используются в антикражных системах, для идентификации багажных мест, содержащих товары, запрещенные, либо ограниченные к перемещению через таможенную границу.

Ключевые слова: таможенный контроль, идентификация багажных мест, рентгенотелевизионные установки, скрытая маркировка, электромагнитная технология, электромагнитные этикетки.

Improving the customs control mechanism is a priority for the Federal Customs Service, as the customs control should be aimed, for one part, at the streamlining and acceleration of the customs formalities, and on the other part, at the defence of the State interests. As it is known, the choice of the customs control forms is based on the principles of selectivity and sufficiency. In this regard, it is often necessary to identify the baggage that may contain prohibited goods with the purpose of the authentication of the persons who move these goods. The work objective is to consider the use of various systems of the nonintrusive identification of the objects that are commonly applied in the anti-theft systems for identifying the baggage containing items that are prohibited or restricted for carrying across the customs border.

Keywords: customs control, baggage identification, X-ray television units, secret marking, electromagnetic technology, electromagnetic labels.

Введение. Одной из приоритетных задач Федеральной таможенной службы на современном этапе является организация сбалансированного, простого и эффективного механизма таможенного контроля. Совершенствование данного механизма должно быть направлено на стимулирование внешнеторговой деятельности, ускорение и упрощение товарооборота, при условии ненанесения ущерба интересам государства и общества (в части пополнения доходной части государственного бюджета и защиты внутреннего рынка).

Применение тех или иных форм таможенного контроля базируется на принципах выборочности и достаточности, причем в отношении товаров, перемещаемых физическими лицами, на современном этапе зачастую возникает

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: nzelig@rambler.ru, Limit0712@yandex.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

необходимость выявления, маркировки и последующей идентификации багажных мест, возможно содержащих товары, запрещенные, либо ограниченные к перемещению через таможенную границу [1].

В качестве примера можно рассмотреть ситуацию, когда при проведении таможенного осмотра всего массива багажа с применением рентгенотелевизионной установки сканирующего типа выявляются багажные места пассажиров, возможно содержащие товары, являющиеся объектами таможенных правонарушений. Возникает необходимость скрытной маркировки указанных грузовых мест с целью их дальнейшего эффективного вычленения из грузопотока. Указанная маркировка и дальнейшая идентификация должны быть максимально простыми, эффективными и не приводящими к излишним трудозатратам и временным потерям.

Постановка задачи. В описанных выше условиях возникает актуальная задача применения технических средств, которые бы позволяли скрытно маркировать и в дальнейшем однозначно идентифицировать «рисковые» объекты контроля, а также идентифицировать физических лиц, пытающихся переместить запрещенные товары.

Для таких «рисковых» объектов контроля может быть осуществлена особая скрытная маркировка, что в последующем предполагает идентификацию посредством генерации звукового или светового сигнала при прохождении между антеннами физического лица с маркированными багажными местами. Такие технические средства могут быть созданы на основе систем для неконтактной идентификации объектов, используемых в антикражных системах.

В настоящее время применяются три вида систем, основанные на следующих технологиях:

1. Радиочастотная (РЧ) (8,2 МГц).
2. Акустомагнитная (АМ) (58 кГц).
3. Электромагнитная (ЭМ) (от 16 Гц до 12,5 кГц).

Все эти технологии используют принцип неконтактной идентификация объектов, для чего используются метки (в английском варианте — tags). Эти метки (однобитные транспондеры) предназначены для подтверждения факта своего наличия в каких-либо вещах. Эти системы включают в себя оборудование: антенны (EAS) радиочастотной, акустомагнитной и электромагнитной технологии, а также расходные материалы [2]. Термин EAS (Electronic Article Surveillance) дословно переводится как «электронное наблюдение за товарами». Рассмотрим наиболее перспективные для целей таможенного контроля технологии, которые нашли широкое в антикражных системах.

Радиочастотная идентификация. Система радиочастотной идентификации [3] основана на использовании некоторого устройства, относящегося к классу RFID (Radio Frequency Identification). RFID — это метод автоматической идентификации объектов, в котором посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в так называемых транспондерах, или RFID-метках. Любая RFID-система состоит из считывающего устройства (считыватель, ридер или интеррогатор) и транспондера (он же RFID-метка или RFID-тег). Большинство RFID-меток состоит из двух частей. Первая — интегральная схема (ИС) для хранения и обработки информации, модулирования и демодулирования радиочастотного (RF) сигнала и некоторых других функций. Вторая — антенна для приёма и передачи сигнала.

Системы RFID условно разделяются в зависимости от используемой метки на активные и пассивные. В активных системах используют метки с источником питания, поэтому такая система работает как приемопередатчик. Системы, построенные по такому принципу, имеют преимущество в том, что в них возможно добиться хорошего соотношения «сигнал/шум» и, как следствие, большой дальности взаимодействия между меткой и считывающем устройством. Недостатком является высокая стоимость и ограничение срока службы.

Пассивные системы работают без питающего элемента и взаимодействие между считывателем и меткой основано на принципе взаимной индукции. Когда метка попадает в электромагнитное поле, создаваемое антенной EAS считывателя, в ней посредством взаимной индукции наводится ток, полученная при этом энергия переизлучается, что и улавливается считывателем. Пассивные метки меньше и легче активных, имеют меньшую стоимость, и фактически неограниченный срок службы. Связь между считывателем и меткой осуществляется посредством электромагнитного поля в радиочастотном диапазоне. Считыватель излучает переменное электромагнитное поле с частотой в диапазоне от 1 до 15 мГц (в России используются частота 8,2 мГц). Когда колебательный LC-контур метки оказывается под воз-

действием электромагнитного поля передатчика, в катушке индуктивности метки, согласно закону взаимной индукции, возникает ток той же частоты. Если частота колебаний внешнего поля f_g равна резонансной частоте колебательного контура, то в LC-контуре метки возникают резонансные колебания, которые улавливаются считывателем.

Преимуществом активных меток по сравнению с пассивными, является значительно большая (в 2–3 раза) дальность считывания информации и высокая допустимая скорость движения активной метки относительно считывателя. Функциональная схема некоторого устройства, относящегося к классу RFID (Radio Frequency Identification), схематически проиллюстрирована на рис. 1 [4].

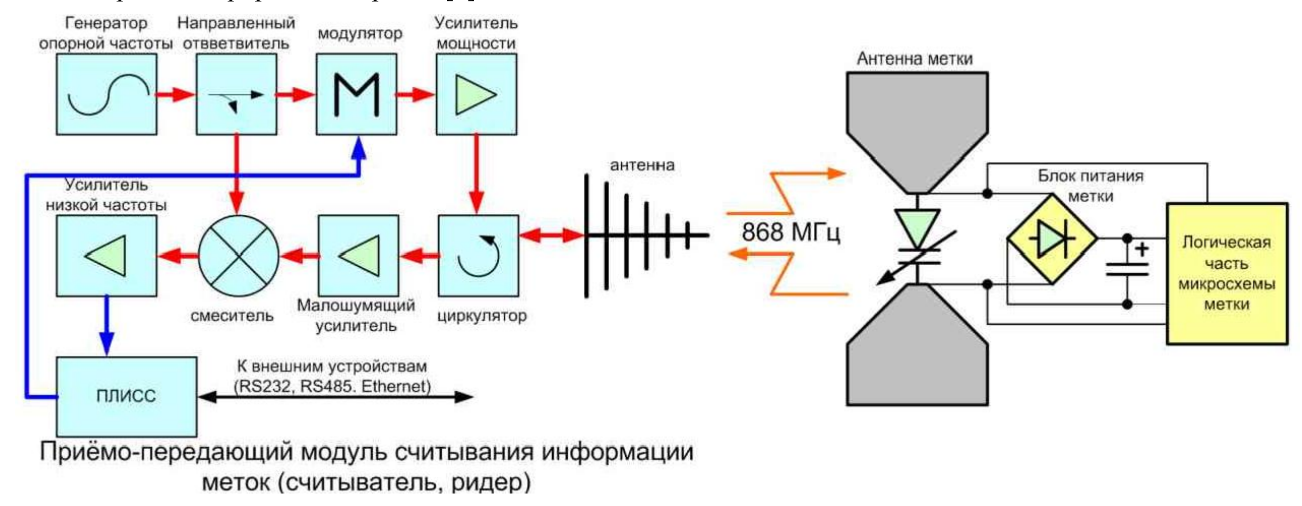


Рис. 1. Функциональная схема системы RFID

Из функциональной схемы видно, что приемо-передающий модуль непрерывно излучает сигнал несущей частоты, воспринимаемый радиометкой (чипом) с собственной антенной системой. В чипе высокочастотный сигнал используется для питания микросхемы, которая высылает ответный сигнал посредством амплитудной модуляции отражённого сигнала. Ответный сигнал фиксируется при опросе метки считывателем. Внешний вид меток радиочастотной идентификации [5] представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид пассивных и активной меток

Существенным недостатком радиочастотных меток является то, что электромагнитное поле экранируется токопроводящими поверхностями [6].

Акустомагнитная идентификация. Системы акустомагнитной технологии имеют самый высокий коэффициент срабатывания (более 95%) и отличаются высокой помехоустойчивостью. Диапазон, в котором работают эти системы, меньше других подвержен шумам и другим помехам, поэтому для систем акустомагнитной технологии характерно отсутствие ложных срабатываний. Благодаря бесконтактной деактивации со звуковым оповещением защитные метки акустомагнитной технологии можно размещать внутри объектов [7].

Принцип работы акустомагнитной метки основан на эффекте камертона — она резонирует и излучает волны на той же частоте после окончания возбуждающего сигнала. Защитная метка содержит специальную металлическую полоску, которая вибрирует при воздействии на нее сигнала определенной частоты (рис. 3) [8].

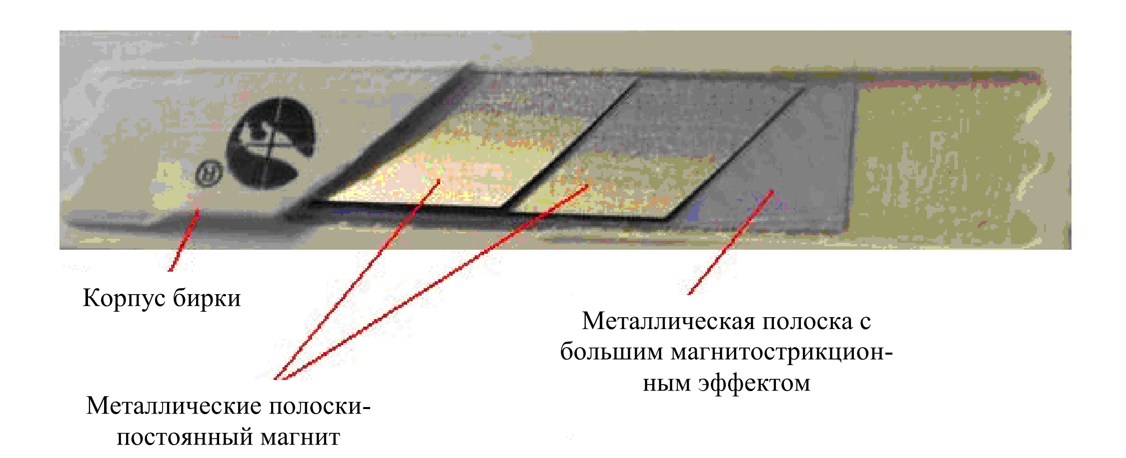


Рис. 3. Метка MiniUltra

Образованное меткой электромагнитное поле попадает в приемник, который выдает соответствующий сигнал. Особенность этих систем состоит в том, что этот сигнал появляется только в случае, если приемник фиксирует последовательность четырех импульсов.

Метка состоит из трех основных элементов:

1. Магнитострикционная полоска выполнена из сплава металла, обладающего сильным магнитострикционным действием. В процессе работы полоска не намагничивается. В этикетке она расположена в нижней части и зафиксирована клеем. При попадании в электромагнитное поле рабочей частоты, она создает сильное переменное магнитное поле вокруг себя.

2. Металлические полоски — постоянные магниты, выполненные из сплава, легко поддающегося перемагничиванию. В рабочем состоянии метки данные полоски слегка намагничены и выполняют роль постоянного магнита. Когда магнитострикционная полоска образует вокруг себя переменное магнитное поле, постоянный магнит начинает механически колебаться в такт частоте этого поля. При выключении передатчика системы магнитострикционная полоска уже не создает магнитного поля, однако колебания постоянного магнита еще продолжаются и начинают возбуждать появление переменного магнитного поля в магнитострикционной полоске. Колебания продолжаются совсем недолго и по убывающей траектории. Этот быстро затухающий сигнал улавливает приемник системы. При деактивации специальным устройством — акустомагнитным деактиватором, полоски постоянного магнита размагничиваются и перестают работать.

3. Корпус метки выполнен из прочного тонкого пластика, вверху которого сформирована область размещения постоянного магнита, для обеспечения его свободного перемещения. В нижней части корпуса располагается магнитострикционная полоска, залитая клеем. Тыльная сторона корпуса снабжена клеевым слоем (двухсторонний скотч 3М), который обеспечивает приклеивание метки.

Все части метки специально рассчитаны и подобраны таким образом, чтобы эффект каждой из ее частей был максимальным. Резонансная частота всей метки в целом сопоставима с рабочей частотой системы, что обеспечивает максимально необходимый эффект. Для простоты восприятия, метку можно представить в виде камертона, после воздействия на который он начинает вибрировать. После удара камертон продолжает вибрировать еще некоторое время и постепенно затухает.

Таким образом, при попадании метки в электромагнитное поле системы, метка начинает свою работу, но так как частоты ее работы полностью соответствуют частотам работы передатчика, уловить ее наличие в поле невозможно — сигнал передатчика, в любом случае, будет мощнее. Для того чтобы метку можно было обнаружить, происходит выключение передатчика и включение приемника. За счет того, что это переключение происходит очень быстро, а метка еще некоторое время продолжает свою работу, приемнику системы удается отследить наличие затухающего сигнала от метки.

Преимущества акустомагнитной технологии [9]:

- Акустомагнитная (АМ) метка (10x44мм) в 4 раза меньше РЧ (40x40мм), что обеспечивает возможность установки её на мелкие предметы.
- АМ датчики не экранируются телом человека.
- АМ датчики срабатывают на фольгированных, металлизированных поверхностях (не ферромагнетиках).

Внешний вид акустомагнитной метки представлен на рис. 4.



Этикетка LE
Размер: 10х44мм;
Рабочая частота: 58КГц;
Вид: белые, с ложным штрих-кодом;
2 контура.

Рис. 4. Внешний вид акустомагнитной метки

Существенным недостатком этой технологии является соблюдение точной частоты питания (50 гц $\pm$ 1%). При уходе частоты за пределы допустимости в 1%, системы отключают передатчики и выдают ошибку о потере синхронизации. При отклонениях постоянного характера системы перестают работать.

Электромагнитная идентификация. Электромагнитная технология состоит в том, что при попадании метки между двумя антеннами в ней индуцируется низкочастотное электромагнитное поле (частота от 70 до 1000 Гц), под действием которого метка постоянно перемагничивается и генерирует излучение, что и фиксируется приемником [10]. Защитные метки детектируются антеннами независимо от того, на какую поверхность они наклеены.

Принцип работы электромагнитной системы похож по действию на радиочастотные технологии, так как магнитные поля низкой и высокой частоты, которые создают антенны, позволяют выявить метку, которая состоит из сплава определённых металлов. При этом изменяется магнитное поле в присутствии метки (транспондера), что фиксируется измерительным прибором [6]. К особенностям систем электромагнитной технологии относятся:

- Усовершенствованный блок управления на базе микропроцессора;
- Высокий уровень срабатываний;
- Совместимость со всеми электромагнитными метками;
- Плоские и малогабаритные метки размером 70 и 40 мм;
- Экранированные пьедесталы;
- Настройка программным способом;
- Простота установки;
- Возможность настройки через модем с помощью ноутбука.

Электромагнитные системы защиты состоят из антенн, предназначенных для создания переменного магнитного поля, и измерительного прибора, реагирующего на появление защитной метки в области его действия. Комплект таких антенн устанавливается на входе в помещение, они оснащены звуковой и световой сигнализацией. В комплект входят пьедесталы, приемники и передатчики. Количество пьедесталов определяется шириной перекрываемого прохода. При небольшой ширине прохода пьедесталов два — приемник и передатчик. Если проход шире, устанавливается несколько пьедесталов, причем количество приемников в этом случае на один больше, чем передатчиков. В качестве метки (транспондера) могут быть использованы различные электромагнитные этикетки, внешний вид которых приведен на рис. 5.



Электромагнитные этикетки типа «полоска»
Размер: 10х32, 10х50, 10х63, 10х90 мм;
Внешний вид: прозрачные, с ложным штрих-кодом;
Вид: деактивируемые, недеактивируемые.



Электромагнитные этикетки типа «ценники»
Размер: 26х16 мм;
Цвет: белые;
Вид: деактивируемые, недеактивируемые.

Рис. 5. Внешний вид электромагнитных этикеток

Преимущества систем электромагнитной технологии [9]:

- Малые размеры этикеток (10x32мм) и их незаметность на проверяемом багаже (прозрачные).
- Устойчивость меток к механическим повреждениям.
- Электромагнитные метки можно размещать на фольгированных, металлизированных поверхностях (не ферромагнетиках).
- Наличие специальной метки, клейкой с двух сторон, которую достаточно трудно обнаружить на предмете.
- Обнаружение запрещенного товара в металлических тележках.
- Высокая степень обнаружения метки за счет применения новой цифровой технологии обработки сигнала.
- Возможность обнаружения защитных меток различных производителей.
- Автоматическая настройка при отключении питания.

Недостатки систем электромагнитной технологии:

- Коэффициент срабатывания (до 85%), наличие «мертвых» зон, в которых система не срабатывает.
- Относительно низкий уровень детекции этикетки, по сравнению с радиочастотной и акустомагнитной технологиями.
- Возможность влияния антенн на расположенные рядом приборы с электронно-лучевой трубкой.

Заключение. Рассмотренные системы дают возможность проводить обследование контролируемых багажных мест с помощью существующего оборудования, что позволяет внести значительное упрощение в проведение таможенных операций и таможенного контроля. Наиболее подходящей для решения поставленной задачи, на взгляд авторов, является система, основанная на базе электромагнитной технологии, которая дает возможность проводить наиболее эффективное выявление контролируемых багажных мест. В этом случае необходимо осуществить модернизацию этой системы с учетом специфики проведения таможенных операций.

Библиографический список

1. Публичная декларация целей и задач таможенной службы Российской Федерации на 2014 год [Электронный ресурс] / Федеральная таможенная служба. — Режим доступа : http://www.customs.ru/ index.php? view=article & catid=422%3A2014-04-29-07-1-25&id=19280 %3A-2/ (дата обращения : 03.02.15).
2. What is an EAS System? [Электронный ресурс] / Retail Theft Prevention. — Режим доступа : http://www.retailtheftprevention.com/ how_stuff_works.html/ (дата обращения : 03.02.15).
3. RFID M поставщик конкурентных преимуществ [Электронный ресурс] / Технологии RFID. — Режим доступа : http://rfid-m.ru/ (дата обращения : 03.02.15).
4. Бурлаков, В. А. Обзор компонентов систем радиочастотной идентификации и их применения [Электронный ресурс] / Современная электроника. — 2005. — № 1. — Режим доступа : http : / www.soel.ru /cms /f/?/ 311548.pdf/ (дата обращения : 03.02.15).
5. О технологии радиочастотной идентификации по-русски и доступно [Электронный ресурс] / RFID для Вас. — Режим доступа: http://rfid4you.my1.ru/index/o_tekhnologi_rfid/0-4/ (дата обращения : 03.02.15).
6. Новейшая российская технология радиочастотной идентификации [Электронный ресурс] / Daily.Sec.Ru публикации. — Режим доступа: http://daily.sec.ru/2012/05/14/Noveyshaya-rossiyskaya-tehnologiya-radiochastotnoy-identifikatsii-CHast-1.html/ (дата обращения : 03.02.15).
7. How Anti-shoplifting Devices Work [Электронный ресурс] / Home Builder Alarm System. — Режим доступа : http://electronics.howstuffworks.com/ everyday-tech/anti-shoplifting-device5.htm/ (дата обращения : 03.02.15).
8. Системы защиты от краж Акустомагнитной технологии [Электронный ресурс] / Video-REC. — Режим доступа : http://video-rec.ru/helpful-information/eas/acoustomagnetic-technology-how-it-works/ (дата обращения : 03.02.15).
9. Акустомагнитные системы [Электронный ресурс] / ТРЭЙД SM TRADE CORP. — Режим доступа : http://www.smtrade.ru/ catalog/akustomagnitnye_sistemy/ (дата обращения : 03.02.15).
10. Electromagnetic Systems [Электронный ресурс] / Applied technologies. — Режим доступа : http:// www2.1-3com.com/ati/solutions/ electromagnetic_ systems.htm/ (дата обращения : 03.02.15).

References

1. Federal'naya tamozhennaya sluzhba. Publichnaya deklaratsiya tseley i zadach tamozhennoy sluzhby Rossiyskoy Federatsii na 2014 god. [Federal Customs Service. Public Declaration of the aims and objectives of the customs service of the Russian Federation for 2014] Available at: http://www.customs.ru/ index.php? view=article & catid=422%3A2014-04-29-07-1-25&id=19280 %3A-2/ (accessed: 03.02.15) (in Russian).
2. What is an EAS System? Retail Theft Prevention. Available at: http://www.retailtheftprevention.com/ how_stuff_works.html/ (accessed: 03.02.15).

3. RFID M postavshchik konkurentnykh preimushchestv. [RFID M supplier of competitive strengths.] RFID Technologies. Available at: http://rfid-m.ru/ (accessed: 03.02.15) (in Russian).

4. Burlakov, V.A. Obzor komponentov sistem radiochastotnoy identifikatsii i ikh primeneniya. [Overview of RFID systems components and their application.] Sovremennaya elektronika, 2005, no. 1. Available at: http: / www.soel.ru /cms /f/?/ 311548.pdf/ (accessed: 03.02.15) (in Russian).

5. O tekhnologii radiochastotnoy identifikatsii po-russki i dostupno. [On RFID technology in Russian and in layman's terms.] RFID for You. Available at: http://rfid4you.my1.ru/index/o_tekhnologi_rfid/0-4/ (accessed: 03.02.15) (in Russian).

6. Noveyshaya rossiyskaya tekhnologiya radiochastotnoy identifikatsii. [The up-to-date Russian technology of radio frequency identification.] Daily.Sec.Ru publications. Available at: http://daily.sec.ru/2012/05/14/Noveyshaya-rossiyskaya-tehnologiya-radiochastotnoy-identifikatsii-CHast-1.html/ (accessed: 03.02.15) (in Russian).

7. How Anti-shoplifting Devices Work. Home Builder Alarm System. Available at: http://electronics.howstuffworks.com/ everyday-tech/anti-shoplifting-device5.htm/ (accessed: 03.02.15).

8. Sistemy zashchity ot krazh akustomagnitnoy tekhnologii. [Anti-theft systems of acoustomagnetic technology.] Video-REC. Available at: http://video-rec.ru/helpful-information/eas/acoustomagnetic-technology-how-it-works/ (accessed: 03.02.15) (in Russian).

9. Akustomagnitnye sistemy. [Acoustomagnetic systems.] TRADE SM TRADE CORP. Available at: http://www.smtrade.ru/ catalog/akustomagnitnye_sistemy/ (accessed: 03.02.15) (in Russian).

10. Electromagnetic Systems. Applied technologies. Available at: http://www2.l-3com.com/ati/solutions/ electromagnetic_ systems.htm/ (accessed: 03.02.15).

Поступила в редакцию 05.02.2015
Сдана в редакцию 12.02.2015
Запланирована в номер 25.09.2015

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 631.354.2-192 DOI 10.12737/16070

Эксплуатационные методы повышения надежности сельскохозяйственной техники*

Д. В. Симон[1**]
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Functional techniques for increasing reliability of agricultural machinery***

D. V. Simon[1**]
[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данного исследования является изучение основных методов управления надежностью сельскохозяйственной техники. Для изучения данного вопроса использовался метод стратегического управления эксплуатационной надежностью. Проведенный анализ позволяет оценить сильные и слабые стороны методов, используемых для повышения надежности изделий. В работе описаны методы управления надежностью в ходе текущего и планового ремонта, технического обслуживания, а также методы, основанные на теории массового обслуживания. Применение каждого из них на разных этапах эксплуатации способствует повышению надежности техники. Таким образом, выявлена необходимость решения задачи по уточнению ряда теоретических законов распределения. Показано, что сроки планового технического обслуживания и ремонта должны соответствовать срокам, обеспечивающим выполнение требований технических условий по надежности эксплуатируемой техники.

Ключевые слова: технический сервис машин, техническое обслуживание, ремонт, теория массового обслуживания, надежность.

The research objective is to investigate the key reliability management techniques for the agricultural machinery. A serviceability strategic management technique is used to study this issue. The analysis allows assessing strengths and weaknesses of the methods used to improve the reliability of products. The reliability management techniques during the current and scheduled repairs, maintenance work, as well as methods based on the queueing theory, are described. The application of each of the techniques at different operational stages contributes to the reliability engineering. Thus, the need for the problem solution to specify a number of theoretical distribution laws is ascertained. It is shown that the routine maintenance and repair timing shall comply with the deadlines to meet the requirements of the technical specifications for the reliability of the equipment in operation.

Keywords: machine technical service, maintenance, repairs, queueing theory, reliability.

Введение. Работоспособность техники в сельском хозяйстве поддерживается системой технического обслуживания и ремонта машин. Своевременные и целесообразные профилактические работы позволяют не только повышать технические характеристики эксплуатируемых машин, но и улучшать показатели их надежности, снижать эксплуатационные расходы. Однако выполнение профилактических работ для поддержания и восстановления работоспособности машин связано со значительными затратами времени и средств. Во многих случаях отказы в работе сложных машин носят скрытый характер и для их выявления требуется дополнительное время, что увеличивает затраты.

Обслуживание сельскохозяйственной техники нацелено на минимизацию суммарных потерь. При этом учитываются затраты, связанные с ухудшением эффективности функционирования техники. Следует отметить, что в большинстве случаев метод проведения профилактических работ соответствует указанным задачам. Таким образом, можно достичь максимально возможных показателей качества функционирования техники, из которых основными являются коэффициенты готовности, оперативной готовности, а также средние суммарные издержки, отнесенные к единице времени работы [1].

Методами теории вероятностей можно найти оптимальный вариант организации профилактического обслуживания. Однако для этого необходимо знать функцию закона распределения времени наработки объекта до отказа. Обычно в качестве критерия оптимальности выбирают минимум удельных затрат на обслуживание (min: $C_{уз}$) или мак-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: simon_denis@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

симум коэффициента готовности (max: $K_г$) [2].

Определение оптимальной стратегии профилактики рассматривают как задачу нахождения наилучшего управления случайным процессом. В сложившейся практике выделяют соответствующие методы управления, различаемые по параметру потока требований на замену деталей или оптимизации системы обменного фонда деталей, сборочных единиц, агрегатов и др. [3]. Профилактические работы могут быть связаны:

— с текущим ремонтом,

— с периодическим техническим обслуживанием,

— с профилактическим ремонтом.

Метод управления надежностью в ходе текущего ремонта. Текущий ремонт производится только после самостоятельного проявления отказа. Отличительная особенность данной стратегии — отсутствие управляющих воздействий предупредительного характера.

В случайный момент времени после поиска причины отказа начинают текущий (внеплановый) ремонт. При этом заменяют или регулируют элемент. Кроме того, устраняют последствия отказа, сопровождающегося относительно небольшими потерями. (Как правило, в данном случае речь идет о таких элементах, как лампы, контрольные приборы, прокладки, сегменты ножей жаток, свечи, распылители форсунок двигателей внутреннего сгорания и т. п.). После ремонта функционирование техники возобновляется.

Группа объектов, эксплуатируемая согласно данному правилу, подвергается только внеплановым восстановительным работам, связанным с устранением причин отказов, поэтому задача ограничивается получением численных значений показателей надежности, где определяющим является время устранения отказа ($T_в$).

Показатели надежности функционирования машин рассчитываются по следующим формулам [4]:

— коэффициент готовности

$$K_г = \overline{T}_о / (\overline{T}_о + \overline{T}_с + \overline{T}_в), \qquad (1)$$

— средние удельные затраты

$$\overline{c}_{уз} = (c_c \overline{T}_c + c_в \overline{T}_в) / \overline{T}_о. \qquad (2)$$

Здесь $\overline{T}_о$ — среднее время работы объектов до отказа; $\overline{T}_с$ — среднее время выявления причины скрытого отказа; $\overline{T}_в$ — средняя длительность текущего ремонта; c_c — потери за единицу времени при наличии в объекте скрытого отказа; $c_в$ — потери за единицу времени при проведении текущего ремонта.

Таким образом, сокращая среднюю длительность текущего ремонта $\overline{T}_в$ (например, за счет своевременной доставки запасной части) и среднее время выявления причины скрытого отказа $\overline{T}_с$, можно повышать надежность в процессе эксплуатации техники и сокращать удельные затраты.

Метод управления надежностью в ходе технического обслуживания. В некоторых машинах невозможно обнаружить причину отказа мгновенно. Состояние механизма определяется только в процессе обслуживания. Соответствующая стратегия предусматривает только плановое обслуживание для предупреждения и обнаружения отказов. Заранее определяется, через какие промежутки времени будет выполняться плановая профилактика. В случае же, если машина к назначенному времени отказала, производится и текущий ремонт [5].

С момента обнаружения отказа и до окончания восстановительных работ машина неработоспособна. По окончании работ назначается время проведения следующего планового обслуживания, и весь процесс повторяется.

Оптимальные периоды $\tau_о$ проведения плановых технических обслуживаний:

$$\tau_о = t + t_{см} - T_{ро}$$

определяются из уравнений [6]:

— для коэффициента готовности

$$K_г = \overline{T}_п / (\overline{T}_в - \overline{T}_п); \qquad (3)$$

— для средних удельных затрат

$$C_{уз} = c_п \overline{T}_п / (c_в \overline{T}_в - c_п \overline{T}_п). \qquad (4)$$

Здесь $\overline{T}_п$ — средняя длительность плановой профилактики; $\overline{T}_в$ — средняя длительность непланового ремонта; $c_п$ — потери за единицу времени при проведении плановой профилактики; $c_в$ — потери за единицу времени при выполнении текущего ремонта; c_c — потери за единицу времени при наличии в объектах скрытого отказа.

Затем рассчитываются показатели надежности по уже приведенным формулам [5]:

— коэффициент готовности

$$K_г = P(\tau_о) / [1 + (\overline{T}_в - \overline{T}_п) f(\tau_о)]; \qquad (5)$$

— средние удельные затраты

$$c_{уз} = c_c F(\tau_o)/P(\tau_o) + (c_в \overline{T}_в - c_n \overline{T}_n)\lambda(\tau_o)\,. \qquad (6)$$

Здесь $\lambda(\tau_o)$ — интенсивность потока отказов объектов; $f(\tau_o)$ — плотность распределения времени работы объектов до отказа; $P(\tau_o)$ — вероятность безотказной работы.

Для облегчения расчетов оптимальных периодов проведения технических обслуживаний на рис. 1, 2 представлены графики функции правой части уравнений (3, 4).

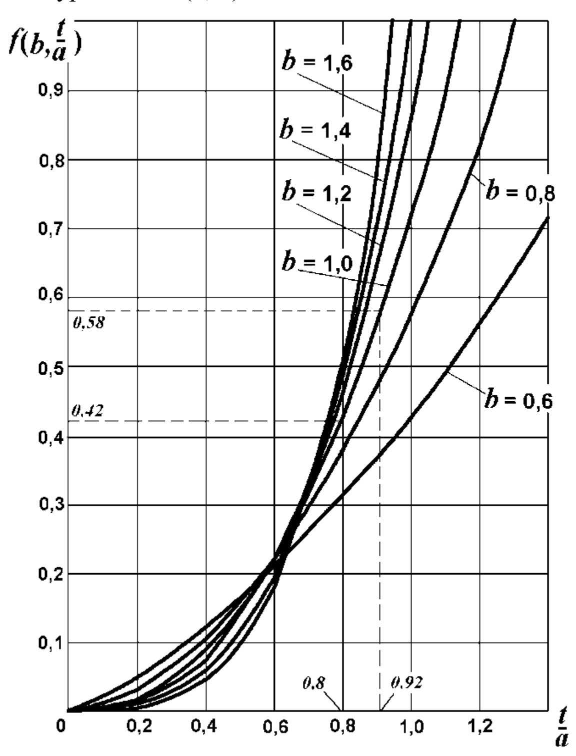


Рис. 1. График функции *f (b, t/a)* — закона распределения Вейбулла для определения оптимальных периодов технического обслуживания

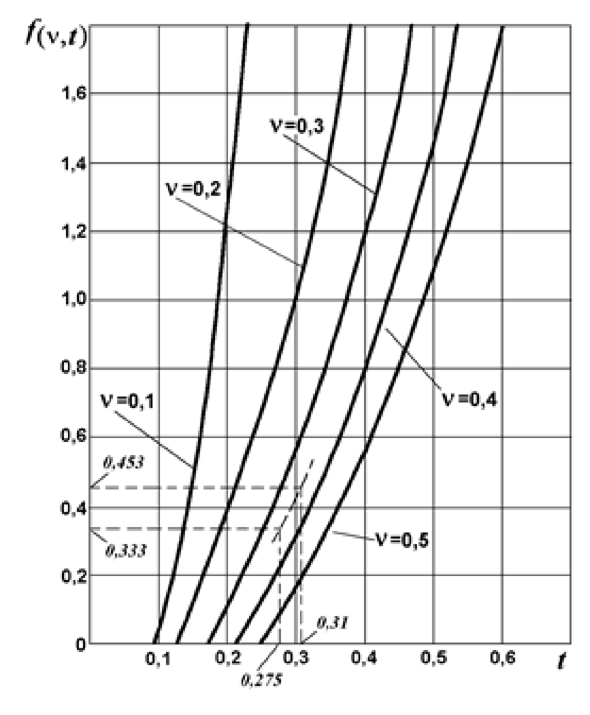


Рис. 2. График функции *f (ν, t)* — нормального закона распределения для определения оптимальных периодов технического обслуживания

Решать проблему повышения эксплуатационной надежности можно за счет увеличения средней продолжительности плановой профилактики $\overline{T}_n$ и сокращения средней длительности внеплановых ремонтов $\overline{T}_в$.

Метод управления надежностью в ходе планового ремонта. С целью обеспечения надежности машин и снижения затрат могут быть использованы эффективные методы, основанные на принудительном контроле технического состояния машин и устранении выявленных или назревающих отказов путем выполнения регулировочных и ремонтных работ.

Плановый (профилактический) ремонт производится в случае, если прогнозируемый параметр достигает критического уровня. Этот параметр необходимо контролировать и измерять непрерывно или периодически. При такой профилактике ремонт не производится, если риск отказа в ближайшее время невелик.

Оптимальную периодичность диагностирования τ_o определяют из формулы [8]

$$\tau_o = k_o \bar{t},$$

где $\bar{t}$ — средняя планируемая наработка; k_o — коэффициент оптимальности, который показывает, во сколько раз оптимальная периодичность диагностирования больше или меньше наработки между отказами.

Графики [9] (рис. 3, 4) позволяют оценить оптимальную периодичность диагностирования, не прибегая к решению сложных уравнений.

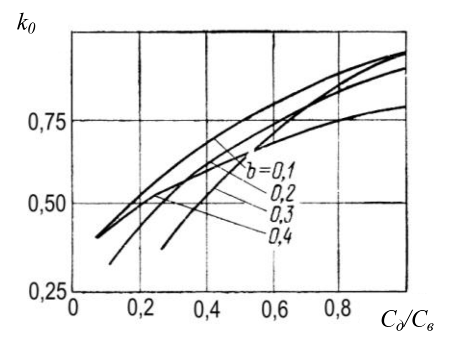


Рис. 3. Зависимость коэффициента оптимальности k_o от отношения $C_д/C_в$ при распределении наработки между отказами по закону Вейбулла ($C_д$ — затраты на выполнение плановой диагностики и обслуживания, $C_в$ — затраты времени при проведении текущего ремонта, *b* — периодичность наработки между отказами)

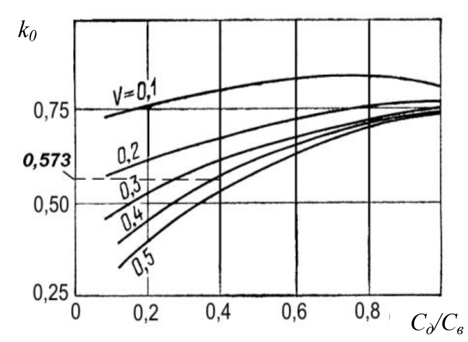


Рис. 4. Зависимость коэффициента оптимальности k_o от отношения средних затрат на профилактику $C_д$ и ремонт $C_в$ при нормальном законе распределения наработки на отказ (*V* — периодичность диагностирования)

С возрастанием коэффициента увеличивается разброс значений наработки между отказами. Чтобы с одинаковой эффективностью предотвращать отказы, следует уменьшить периодичность диагностики.

При нормальном распределении наработки между отказами оптимальная периодичность приближается к среднему значению с увеличением отношения $C_д/C_в$ и коэффициента оптимальности. Это свидетельствует о том, что углубленная диагностика и обслуживание, требующие больших затрат, более эффективно предотвращают отказы.

Для закона нормального распределения оптимальная периодичность диагностирования не должна превышать 0,90*t*. При распределении наработки по закону Вейбулла с возрастанием отношения $C_д/C_в$ коэффициент оптимальности увеличивается.

Углубленная профилактика, требующая больших затрат, более эффективно предотвращает отказы, поэтому периодичность диагностики может возрасти. Система технического обслуживания и ремонта тракторов и машин должна базироваться:

— на принудительном контроле через определенную наработку;

— на выполнении при необходимости регулировочных и ремонтных работ.

Метод управления надежностью на основе теории массового обслуживания. При использовании метода, основанного на теории массового обслуживания [10], следует определить оптимальное количество запасных частей. При со-

ответствующих расчетах исходят из минимально необходимого для обменного фонда количества n_{min} деталей, сборочных единиц или агрегатов, которое обеспечило бы требуемую надежность сельскохозяйственной машины в процессе эксплуатации.

Из теории массового обслуживания известно, что система справляется и очередь не будет расти неограниченно, если

$$n_{min} = 1 + \lambda/\nu, \tag{7}$$

где λ — параметр потока требований на замену деталей, сборочных единиц или агрегатов, шт./день; ν — параметр обслуживающей системы, день$^{-1}$.

Параметр потока требований на замену деталей, сборочных единиц или агрегатов определяется по формуле

$$\lambda = N_з/d_p, \tag{8}$$

где $N_з$ — число замен неисправных деталей, сборочных единиц или агрегатов;
d_p — количество рабочих дней в расчетном периоде (год).

Параметр обслуживающей системы определяется из выражения

$$\nu = 1/\overline{T}_{об} ,$$

где $\overline{T}_{об}$ — среднее время (дни) оборота деталей, сборочных единиц или агрегатов.

Полученное значение n_{min} округляется до целого числа.

Под системой обслуживания машин обменными узлами понимается определенное количество обменных узлов на складе . Каждая деталь, сборочная единица или агрегат может удовлетворить только одно требование. Если в момент поступления требования есть хоть один свободный узел, то обслуживание осуществляется немедленно. Если число машин, требующих замены данного узла, превысит количество обменных узлов на складе, то образуется очередь машин, ожидающих замены узлов. Смысл рассматриваемого подхода заключается в том, чтобы определить количество деталей, сборочных единиц или агрегатов, при котором очередь не росла бы бесконечно [12]. Важнейшей характеристикой системы обслуживания в целом считается время, которое представляет собой случайную величину, зависящую от многих факторов.

Применительно к сельскохозяйственной технике временем обслуживания является период от момента выдачи исправного агрегата со склада до времени, когда на склад поступит исправный (новый), способный удовлетворить очередную заявку на замену. Данный период состоит из различных этапов в зависимости от того, для какого звена ремонтной базы рассчитывается обменный фонд.

Для склада дилера (раньше это называлось «технический обменный пункт») время обслуживания $T_{об}$ определяется из выражения:

$$T_{об} = T_1 + T_2 + T_3, \tag{9}$$

где T_1 — время хранения и ожидания отправки неисправных деталей, сборочных единиц или агрегатов на специализированное ремонтное предприятие, день; T_2 — время транспортировки узла на специализированное ремонтное предприятие и обратно, день; T_3 — время ожидания и получения исправного узла на специализированном ремонтном предприятии, день.

Оптимизация на основе теории массового обслуживания строится на минимизации приведенных затрат

$$C_{пр} = C_{пс} + C_{оф} + C_{ск} \rightarrow min, \tag{10}$$

где $C_{пс}$ — величина потерь от сверхдопустимых простоев машин и оборудования; $C_{оф}$ — величина потерь от затрат на создание складского хозяйства; $C_{ск}$ — величина потерь от затрат на создание и содержание складских помещений.

Использование методов теории массового обслуживания целесообразно в тех случаях, когда детали, сборочные единицы и агрегаты ремонтируются по месту нахождения склада, т. е. в мастерской сельхозпроизводителя.

Выводы. Исходя из теоретических предпосылок, в процессе эксплуатации зерноуборочной техники возможно выполнение требований ТУ (ТЗ) по надежности за счет использования плановых методов ремонта и технического обслуживания [13]. Однако рассмотренные методы в основном базируются на теоретических предпосылках о законах распределения надежности того или иного элемента машины применительно к плановой системе хозяйствования.

Следует отметить, что теоретические результаты по надежности могут не совпадать с результатами эксплуатации. В этом случае, очевидно, необходимо решать задачи по уточнению:

— теоретических законов распределения и достоверности используемых результатов;
— сроков проведения текущего ремонта и плановых технических обслуживаний.

Библиографический список

1. О дилерском обслуживании техники в сельском хозяйстве / Н. А. Дорофеева [и др.] // Техника и оборудование для села. — 2001. — № 5. — 43 с.

2. Ксенофонтов, А. С. Надежность технических систем : учеб. пособ. / А. С. Ксенофонтов. — Краснодар : КубГУ, 2010. — 211 с.

3. Царев, Ю. А. Оптимизация многоуровневого складского хозяйства предприятий технического сервиса / Ю. А. Царев, А. А. Рябых // Тракторы и сельхозмашины. — 2010. — № 12 — с. 37-39.

4. Острейковский, В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. — Москва : Высшая школа, 2003. — 463 с.

5. Кубарев, А. И. Надежность в машиностроении / А. И. Кубарев. — Москва : Издательство стандартов, 1989. — 224 с.

6. Эксплуатационная надежность сельскохозяйственных машин / В. Я. Анилович [и др.]. — Минск : Ураджай, 1974. — 264 с.

7. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. — Москва : Наука, 1956. — 254 с.

8. Кряжков, В. М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники / В. М. Кряжков. — Москва : Агропромиздат, 1989. — 335 с.

9. Федоров, Е. М. Обеспечение надежности при эксплуатации машин. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Надежность технических систем» / Е. М. Федоров. — Ростов-на-Дону : РГАСХМ, 2002. — 56 с.

10. Царев, Ю. А. Информационно-аналитическая система прогнозирования потребности в запчастях / Ю. А. Царев, М. А. Рыбалкин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2007. — № 1 — 43 с.

11. Bergan, H. Extending the reach of the quality improvement paradigm / H. Bergan // Quality Progress. — 1990. — № 5. — P. 51–52.

12. Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction / ed. A. Gorban [et al.] // Lecture Notes in Computational Science and Engineering. 2007. — Vol. 58. — 336 p.

References

1. Dorofeyeva, N.A., et al. O dilerskom obsluzhivanii tekhniki v sel'skom khozyaystve. [On dealer service technol gy in agriculture.] Machinery and Equipment for Rural Area, 2001, no. 5, 43 p. (in Russian).

2. Ksenofontov, A.S. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. [Reliability of technical systems.] Krasnodar: KubGU, 2010, 211 p. (in Russian).

3. Tsariov, Yu.A., Ryabykh, A.A. Optimizatsiya mnogourovnevogo skladskogo khozyaystva predpriyatiy tekhnicheskogo servisa. [Optimization of multilevel storage facilities of technical service enterprises for grain and forage combine harvesters.] Tractors and Agricultural Machinery, 2010, no. 12, pp. 37-39. (in Russian).

4. Ostreykovskiy, V.A. Teoriya nadezhnosti. [Theory of reliability.] Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 463 p. (in Russian).

5. Kubarev, A.I. Nadezhnost' v mashinostroenii. [Reliability in mechanical engineering.] Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1989, 224 p. (in Russian).

6. Anilovich, V.Y., et al. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' sel'skokhozyaystvennykh mashin. [The operational reliability of agricultural machines.] Minsk: Uradzhay, 1974, 264 p. (in Russian).

7. Gnedenko, B.V., Belyaev, Y.K., Solovyev, A.D. Matematicheskiye metody v teorii nadezhnosti. [Mathematical methods of reliability theory.] Moscow: Nauka, 1956, 254 p. (in Russian).

8. Kryazhkov, V.M. Nadezhnost' i kachestvo sel'skokhozyaystvennoy tekhniki. [Reliability and quality of agricultural engineering.] Moscow: Agropromizdat, 1989, 335 p. (in Russian).

9. Fedorov, E.M. Obespechenie nadezhnosti pri ekspluatatsii mashin. Metodicheskie ukazaniya k prakticheskim zanyatiyam po distsipline «Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem». [Reliability control under machine operation. Guidelines for practical studies on “Reliability of technical systems”.] Rostov-on-Don: RGASKhM, 2002, 56 p. (in Russian).

10. Tsarev, Yu.A., Rybalkin, M.A. Informatsionno-analiticheskaya sistema prognozirovaniya potrebnosti v zapchastyakh. [The information-analytical prediction system for spare parts requirement.] Tractors and Agricultural Machinery 2007, no. 1, 43 p. (in Russian).

11. Bergan, H. Extending the reach of the quality improvement paradigm. Quality Progress, 1990, vol. 23, no. 5, pp. 51–52.

12. Gorban, A., ed., et al. Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, 2007, vol. 58, 336 p.

Поступила в редакцию 22.07.2015
Сдана в редакцию 23.07.2015
Запланирована в номер 24.09.2015

Сведения об авторах

Агеев, Станислав Олегович, stageev@inbox.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Айзикович, Сергей Михайлович, saizikovich@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Ассауленко, Семен Семенович, Assaulenko_s@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Бурлакова, Виктория Эдуардовна, vburlakova@donstu.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Дао, Тхе Ань, daoanh2010@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Деундяк, Владимир Михайлович, vl.deundyak@gmail.com	Южный федеральный университет; ФГНУ «НИИ «Спецвузавтоматика», Россия
Долгов, Александр Иванович, dolgov-ai@yandex.ru	Акционерное общество «Конструкторское бюро по радиоконтролю систем управления, навигации и связи», Россия
Дроган, Екатерина Геннадьевна, ekaterina.drogan@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Дымочкин, Денис Димитриевич, dydedmi_77_06_02@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Золотых, Светлана Андреевна, Svetlana.zolotyx@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Калиниченко, Андрей Александрович, kaa2307@gmail.com	ФБУ ЮРЦСЭ МЮ, Россия
Князев, Сергей Юрьевич, ksy@donpac.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Колесников, Игорь Владимирович, kvi@rgups.ru	Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
Костоглотов, Андрей Александрович, kostoglotov@icloud.com	Донской государственный технический университет, Россия
Кренев, Леонид Иванович, lkrenev@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Кузнецов, Антон Александрович, smithaa@yandex.ru.	Военный учебно — научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Россия
Лазаренко, Сергей Валерьевич, rh3311@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Лемешев, Сергей Владимирович , lemeshev.serj@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Лосев, Виталий Александрович, aibolit_773@mail.ru	Донской государственный технический университет Россия
Лукьянов, Виталий Федорович, Vfl1@bk.ru	Донской государственный технический университет, Россия

Митрин, Борис Игоревич, Донской государственный технический университет, Россия
boris.mitrin@gmail.com

Нейдорф, Рудольф Анатольевич, Донской государственный технический университет, Россия
ran_pro@mail.ru

Нескоромный, Станислав Валерьевич, Донской государственный технический университет, Россия
escoromniy@mail.ru

Новикова, Анастасия Александровна, Донской государственный технический университет, Россия
anastasianovik@mail.ru

Полях, Виктор Васильевич, Донской государственный технический университет, Россия
silvervpolyah@gmail.com

Попова, Светлана Борисовна, Южный федеральный университет, Россия
svetyla92@mail.ru

Приходько, Александр Александрович, Кубанский государственный технологический университет, Россия
sannic92@gmail.com

Пустовойт, Виктор Николаевич, Донской государственный технический университет, Россия

Садырин, Евгений Валерьевич, Донской государственный технический университет, Россия
evgeniy.sadyrin@gmail.com

Сидоренко Валентин Сергеевич Донской государственный технический университет, Россия
vsidorenko@dstu.edu.ru

Симон, Денис Владимирович, Донской государственный технический университет, Россия
simon_denis@mail.ru

Смелягин, Анатолий Игоревич, Кубанский государственный технологический университет, Россия
asmelyagin@yandex.ru

Стрижаков, Евгений Львович, Донской государственный технический университет, Россия
strizhakov@inbox.ru

Целигоров, Николай Александрович, Ростовский филиал Российской таможенной академии, Россия
nzelig@rambler.ru

Черногоров, Иван Владимирович, Донской государственный технический университет, Россия
hintaivr@gmail.com

Щерба, Михаил Юрьевич, Ростовский филиал Российской таможенной академии, Россия
Limit0712@yandex.ru

Щербаков, Антон Андреевич, ООО «ПК «НЭВЗ», Россия
AnSherbakov@mail.ru

Щербаков, Владимир Николаевич. Донской государственный технический университет, Россия
Vladnik48@aaanet.ru

Щербакова, Елена Евгеньевна, Донской государственный технический университет, Россия
Sherbakovaee@mail.ru

Ярахмедов, Орхан Тахир Оглы, Донской государственный технический университет, Россия
orhashka@gmail.com

INDEX

Ageyev, Stanislav O., Don State Technical University, Russia
stageev@inbox.ru

Aizikovich, Sergey M., Don State Technical University, Russia
saizikovich@gmail.com

Assaulenko, Semen S., Don State Technical University, Russia
Assaulenko_s@mail.ru

Burlakova, Victoriya E., Don State Technical University, Russia
vburlakova@donstu.ru

Chernogorov, Ivan V., Don State Technical University, Russia
hintaivr@gmail.com

Dao The Anh, Don State Technical University, Russia
daoanh2010@mail.ru

Deundyak, Vladimir M., Southern Federal University, Research Institute “Spetsvuzavtomatika”, Russia
vl.deundyak@gmail.com

Dolgov, Alexander I. “Design bureau on monitoring of control, navigation and communication systems” JSC, Russia
dolgov-ai@yandex.ru

Drogan, Ekaterina G., Don State Technical University, Russia
ekaterina.drogan@gmail.com

Dymochkin, Denis D., Don State Technical University, Russia
dydedmi_77_06_02@mail.ru

Kalinichenko, Andrey A., Southern Regional Forensic Centre of the Ministry of Justice, Russia
kaa2307@gmail.com

Knyazev, Sergey Yu., Don State Technical University, Russia
ksy@donpac.ru

Kolesnikov, Igor V., Rostov State Transport University, Russia
kvi@rgups.ru

Kostoglotov, Andrey A., Don State Technical University, Russia
kostoglotov@icloud.com

Krenev, Leonid I., Don State Technical University, Russia
lkrenev@yandex.ru

Kuznetsov, Anton A., Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy, Russia
smithaa@yandex.ru.

Lazarenko, Sergey V., Don State Technical University, Russia
rh3311@mail.ru

Lemeshev, Sergey V., Don State Technical University, Russia
lemeshev.serj@yandex.ru

Losev, Vitaly A., Institute of Service and Business, DSTU branch, Russia
aibolit_773@mail.ru

Lukyanov, Vitaly F., Don State Technical University, Russia
Vfl1@bk.ru

Mitrin, Boris I., Don State Technical University, Russia
boris.mitrin@gmail.com

Neskoromniy, Stanislav V., Don State Technical University, Russia
nescoromniy@mail.ru
Neydorf, Rudolf A., Don State Technical University, Russia
ran_pro@mail.ru
Novikova, Anastasia A., Don State Technical University, Russia
anastasianovik@mail.ru
Polyakh, Victor V., Don State Technical University, Russia
silvervpolyah@gmail.com
Popova, Svetlana B., Southern Federal University, Russia
svetyla92@mail.ru
Prikhodko, Alexander A., Kuban State Technological University, Russia
sannic92@gmail.com
Pustovoyt, Victor N. Don State Technical University, Russia
Sadyrin, Evgeniy V., Don State Technical University, Russia
evgeniy.sadyrin@gmail.com
Shcherba, Mikhail Y., Russian Customs Academy, Rostov Branch , Russia
Limit0712 @ yandex.ru
Shcherbakov, Anton A., Novocherkassk Electric Locomotive Plant (NEVZ), Russia
AnSherbakov@mail.ru
Shcherbakov, Vladimir N. Don State Technical University, Russia
Vladnik48@aaanet.ru
Shcherbakova, Elena E., Don State Technical University, Russia
Sherbakovaee@mail.ru
Sidorenko, Valentin S., Don State Technical University, Russia
vsidorenko@dstu.edu.ru
Simon, Denis V. Don State Technical University, Russia
simon_denis@mail.ru
Smelyagin, Anatoly I., Kuban State Technological University, Russia
asmelyagin@yandex.ru
Strizhakov, Evgeny L., Don State Technical University, Russia
strizhakov@inbox.ru
Tseligorov, Nikolay A. Russian Customs Academy, Rostov Branch, Russia
nzelig@rambler.ru
Yarakhmedov, Orkhan Takhir Ogly, Don State Technical University, Russia
orhashka@gmail.com
Zolotykh , Svetlana A., Don State Technical University, Russia
Svetlana.zolotyx@mail.ru